



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Politècnica Superior d'Edificació
de Barcelona

ENGINYERIA EN GEOINFORMACIÓ I GEOMÀTICA

TREBALL DE FI DE GRAU

ANÀLISI FENOLOGIC DE LA VEGETACIÓ AMB SÈRIES TEMPORALS D'NDVI A CATALUNYA I LA SEVA RELACIÓ AMB EL CANVI CLIMÀTIC

Projectista: Lluís Solà Castro

Directora: Càrol Puig Polo

Convocatòria: Setembre/Octubre 2019

Resum

En les últimes dècades ha sorgit una gran interès en estudiar la dinàmica de la vegetació com a indicador del canvi climàtic a causa de l'alta sensibilitat de la mateixa a variables climàtiques fonamentals, com poden ser la precipitació i la temperatura.

L'índex de vegetació de diferència normalitzada (NDVI, pel seu acrònim en anglès), que es pot obtenir a través de les bandes del vermell i l'infraroig proper mesurat per imatges de satèl·lit, permet estudiar l'estat fenològic de la vegetació. En concret, el sensor MODIS, embarcat en els satèl·lits Terra i Aqua, proporciona dades des de l'any 2000 i fins a l'actualitat de diferents tipologies d'índex de vegetació a escala global i amb una resolució temporal de 16 dies.

Diversos estudis han demostrat que l'inici i el final de l'estació de creixement de la vegetació s'han avançat i retardat respectivament, així com d'altres han estudiat la relació entre la vegetació i els factors climatològics.

En aquest TFG es volen estudiar aquests fenòmens a Catalunya a partir de dades de vegetació obtingudes pel sensor MODIS i dades de precipitació i temperatura de models climàtics existents.

El resultat esperat és la confirmació, o no, de l'existència d'una modificació en el temps d'inici i la durada de l'estació de creixement de la vegetació, i la creació d'una visió global de l'estat de la vegetació a Catalunya.

Índex

Resum.....	1
1. Introducció	5
1.1. Objectius	6
2. Àrea d'estudi	7
3. Projecte MODIS	9
4. Dades.....	11
4.1. Índex de vegetació NDVI MOD13Q1 v006	11
4.2. Dades climàtiques Spain02 v5.....	14
4.2.1. Dades de precipitació.....	14
4.2.2. Dades de temperatura	14
4.3. Cobertes del sòl MCD12Q1 v006	15
5. Metodologia	19
5.1. Preparació de la sèrie inicial d'imatges d'NDVI.....	19
5.2. Aplicació del filtre temporal.....	19
5.3. Tendència de l'estacionalitat de la vegetació	20
5.3.1. Canvi de periodicitat de les dades.....	20
5.3.2. Càlcul de l'estacionalitat de la vegetació	21
5.3.3. Càlcul de la tendència de l'estacionalitat de la vegetació.....	22
5.4. Tendència de l'estat general de la vegetació.....	23
5.4.1. Agrupació temporal de les dades.....	23
5.4.2. Càlcul de la tendència de l'estat general de la vegetació	23
5.5. Correlació entre la vegetació i les dades climàtiques	24
5.5.1. Preparació de les dades climàtiques	24
5.5.2. Normalització de les dades	24
5.5.3. Càlcul de la correlació entre la vegetació i les dades climàtiques	24
6. Resultats	27
6.1. Tendència de l'estacionalitat de la vegetació	27
6.1.1. Inici de l'estació de creixement.....	28
6.1.2. Final de l'estació de creixement.....	29
6.1.3. Durada de l'estació de creixement.....	30
6.1.4. Punt màxim de l'estació de creixement.....	31
6.2. Tendència de l'estat general de la vegetació.....	31
6.3. Correlació entre la vegetació i les dades climàtiques	34

6.3.1.	Vegetació – Precipitació	34
6.3.2.	Vegetació – Temperatura.....	36
6.3.2.1.	Vegetació – Temperatura màxima	36
6.3.2.2.	Vegetació – Temperatura mínima.....	37
6.3.2.3.	Vegetació – Temperatura mitjana.....	38
6.3.3.	Resum.....	39
7.	Conclusions	41
	Bibliografia	43
	Agraïments	45
	Annex	47

1. Introducció

Avui en dia gairebé ningú dubta de l'existència i els efectes del canvi climàtic sobre els ecosistemes terrestres. Tant els governs com la ciutadania semblen haver acceptat aquest fet i l'obligació de plantejar solucions al problema. En aquest sentit, el 22 d'abril de 2016 es va signar l'Acord de París, negociat durant la XXI Conferència sobre el Canvi Climàtic (COP 21) pels 195 països membres de la ONU. La principal mesura adoptada va ser la limitació de l'augment de la temperatura global a 1,5 °C.

L'escalfament global, en gran part, és originat per l'efecte hivernacle produït per l'emissió de gasos a l'atmosfera per part de l'ésser humà. Aquest està provocant la modificació temporal, radicalització o neutralització de diferents fenòmens naturals, atmosfèrics o climatològics arreu del planeta, com el règim pluviomètric, el desglaç de les zones polars o la desertització (Figura 1), per exemple. Altres causes de l'escalfament global les podem trobar en la massiva generació de residus o en la desforestació, ja sigui provocada per tals massives o incendis.

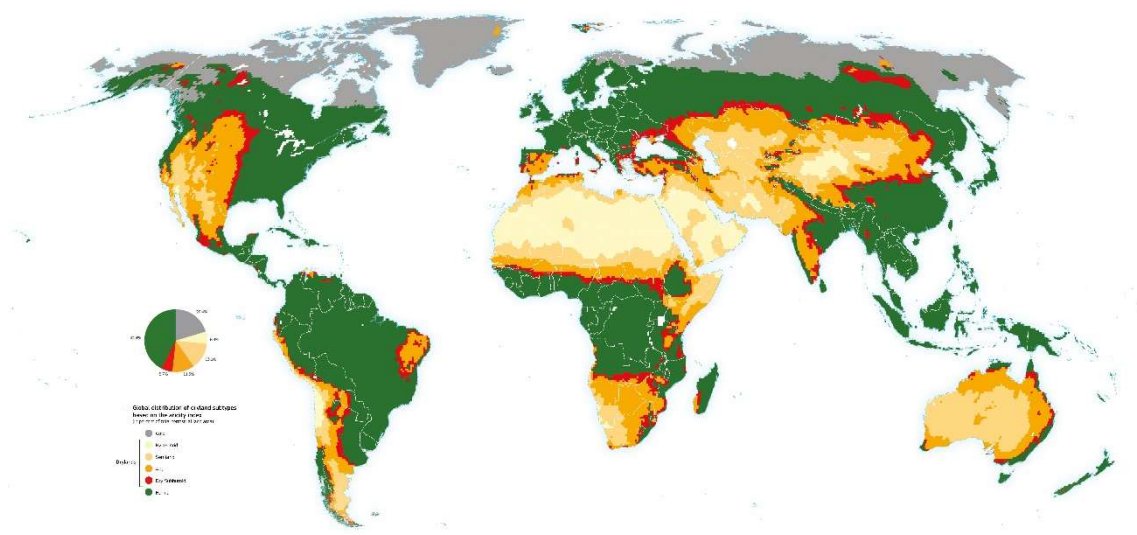


Figura 1. Distribució global de les terres àrides en base a l'índex d'aridesa (IA). Font: World Atlas of Desertification.

La vegetació és un element clau per a la vida. A part de la seva funció essencial com a regeneradora de l'aire, serveix com a hàbitat i aliment de gran part de les espècies animals i fixa el terreny per protegir-lo de l'erosió i evitar que aquest perdi els nutrients bàsics que conté. Per altra banda, la vegetació és molt vulnerable als canvis de les variables climàtiques fonamentals, com poden ser la precipitació i la temperatura (Felicísimo et al. 2012). Per això, s'ha generat un gran interès en la realització de diferents estudis fenològics sobre l'estat o les dinàmiques de creixement de la vegetació tant a nivell global com regional (Guo et al. 2014). La fenologia és la branca de l'ecologia que estudia les relacions entre els factors climàtics i els cicles o esdeveniments estacionals que es donen a la natura.

Catalunya és una regió amb una biodiversitat molt rica, amb diferents zones d'alta muntanya, de costa, o grans planes interiors concentrades en una petita extensió de territori, i amb el 32%

d'aquest considerat com a protegit. Gairebé el 60% del territori català està cobert de vegetació, i veient la situació global en la que ens trobem, és digne de ser estudiat.

Les tècniques de teledetecció són les adequades per realitzar aquests tipus d'estudi. Les imatges captades pels satèl·lits poden oferir una cobertura global del territori i sèries temporals llargues i actualitzades pràcticament a temps real. A més, són fàcils d'obtenir. Una de les principals aplicacions de les imatges de satèl·lit són els índex de vegetació, com per exemple l'Índex de Vegetació de Diferència Normalitzada (NDVI, per les seves en anglès), àmpliament utilitzats per a la monitorització de la vegetació (densitat, creixement, etc.). I en aquest sentit, cal destacar el sensor MODIS, el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, instal·lat en els satèl·lits Terra i Aqua de la NASA.

1.1. Objectius

L'objectiu d'aquest treball és mostrar l'estat general de la vegetació a Catalunya mitjançant l'estudi de sèries temporals d'NDVI i altres dades climàtiques, com la precipitació i la temperatura ambiental, i així poder determinar el canvis que ha sofert en el període comprés entre l'any 2000 i el 2018 i si s'ha vist afectada per el canvi climàtic. Per assolir aquest objectiu principal, el projecte s'ha estructurat en tres anàlisis independents que han permès crear una visió global del cas. Són els següents:

- Definir les tendències temporals de l'estació de creixement de la vegetació i analitzar-les per determinar si aquesta s'avança o s'endarrereix al llarg del període de temps estudiat.
- Calcular la tendència de l'estat general de la vegetació en funció de l'índex NDVI.
- Comparar l'estat de la vegetació amb les dades de precipitació i temperatura per poder definir la relació que hi ha entre elles.

2. Àrea d'estudi

El projecte s'ha dirigit a estudiar tot el territori de Catalunya. No obstant, per la facilitat de maneig que comporta, a la pràctica s'ha treballat amb un retall rectangular de dimensions predefinides (Figura 2).

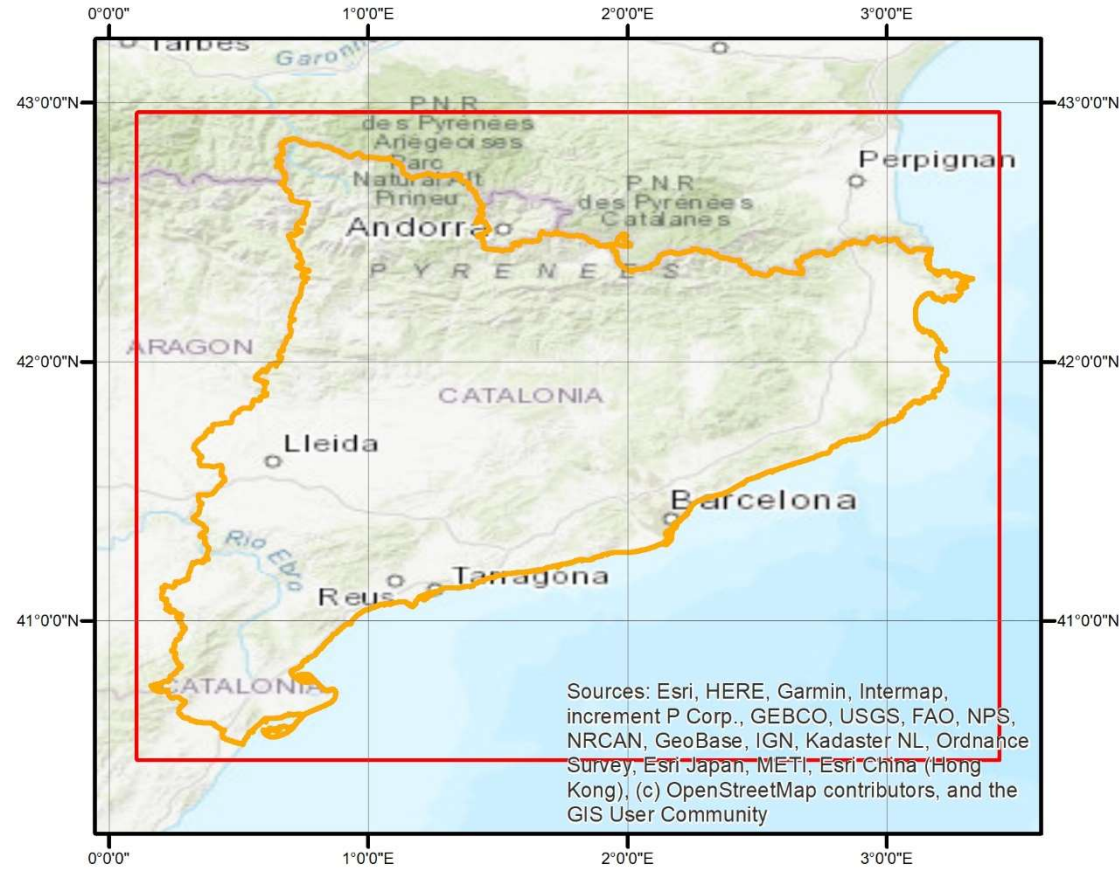




Figura 2. Àrea d'estudi.

Superfícies	
	Catalunya (32.105 km²)
	Àrea d'estudi (76.973 km²)

Així doncs, el retall utilitzat està emmarcat en les següents coordenades geogràfiques (Taula 1):

Taula 1. Coordenades i àmbit geogràfic de l'àrea d'estudi.

	Cantonada SW	Cantonada NE	Àmbit geogràfic
Longitud E (°)	0,1041667	3,4375000	3,3333333
Latitud N (°)	40,4625000	42,9625000	2,5000000

3. Projecte MODIS

El MODIS és un sensor instal·lat en els satèl·lits Terra i Aqua de la NASA dedicat a capturar imatges per tal d'estudiar els fenòmens globals que tenen lloc tant a la superfície terrestre, als oceans i a les capes inferiors de l'atmosfera. Amb aquesta informació és possible la creació de diferents models globals que permeten la predicció de canvis (per exemple els relacionats amb el canvi climàtic) i la presa de decisions pel que fa a polítiques mediambientals o a actuacions en cas de desastres naturals (Figura 3). Per a més informació sobre el projecte MODIS es pot consultar la pàgina web <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.

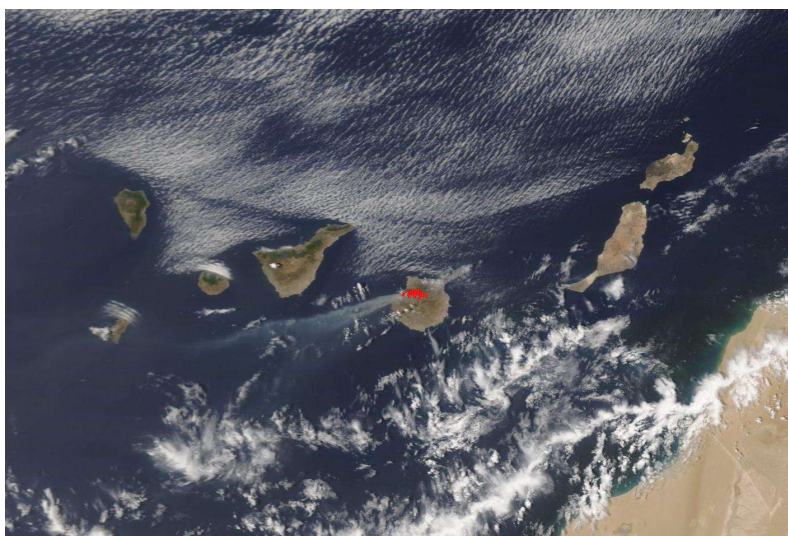


Figura 3. Incendi forestal a l'illa de Gran Canaria (Espanya): Imatge en color natural amb les àrees amb incendi actiu detectades per les bandes tèrmiques del sensor MODIS. Font: NASA.

El satèl·lit Terra es va posar en òrbita el 18 de desembre de 1999 i l'Aqua el 4 de maig de 2002. Els dos segueixen una òrbita heliosíncrona pràcticament polar (98,5° i 98,2° respectivament) a 705 km d'altura respecte la superfície terrestre, pel que sempre creuen l'equador a les 10:30h en mode descendent (Terra) i a les 13:30h en mode ascendent (Aqua), amb un total de 16 òrbites diàries. Per a més informació sobre els satèl·lits Terra i Aqua es poden consultar les pàgines web <https://terra.nasa.gov/> i <https://aqua.nasa.gov/>.

A part del sensor MODIS, els dos satèl·lits porten equipats altres instruments capaços d'obtenir imatges que s'utilitzen per estudiar, per exemple, les radiacions o la presència d'aerosols a l'atmosfera, el núvols, el cicle de l'aigua, l'estat de les capes de gel o l'estat de la vegetació. En aquest últim camp hi té molta importància el sensor MODIS, ja que les dades que ofereix són de les més utilitzades arreu del món.

El sensor MODIS captura imatges en 36 bandes espectrals (Taula 2), cobrint l'espectre electromagnètic entre les longituds d'ona de 0,405 μm (visible) i 14,385 μm (infraroig). Té una franja de visió de 2.330 km, el que li permet cobrir completament la Terra cada 1 o 2 dies. Obté imatges amb unes resolucions espacials de 250 m, 500 m i 1.000 m.

Taula 2. Bandes espectrals del sensor MODIS.

Ús primari	Banda	Longitud d'ona (µm)	Resolució espacial (m)
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	0,620 - 0,670	250
	2	0,841 - 0,876	250
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	0,459 - 0,479	500
	4	0,545 - 0,565	500
	5	1,230 - 1,250	500
	6	1,628 - 1,652	500
	7	2,105 - 2,155	500
Ocean Color/Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	0,405 - 0,420	1.000
	9	0,438 - 0,448	1.000
	10	0,483 - 0,493	1.000
	11	0,526 - 0,536	1.000
	12	0,546 - 0,556	1.000
	13	0,662 - 0,672	1.000
	14	0,673 - 0,683	1.000
	15	0,743 - 0,753	1.000
Atmospheric Water Vapor	16	0,862 - 0,877	1.000
	17	0,890 - 0,920	1.000
	18	0,931 - 0,941	1.000
	19	0,915 - 0,965	1.000

Ús primari	Banda	Longitud d'ona (µm)	Resolució espacial (m)
Surface/Cloud Temperature	20	3,660 - 3,840	1.000
	21	3,929 - 3,989	1.000
	22	3,929 - 3,989	1.000
Atmospheric Temperature	23	4,020 - 4,080	1.000
	24	4,433 - 4,498	1.000
Cirrus Clouds Water Vapor	25	4,482 - 4,549	1.000
	26	1,360 - 1,390	1.000
	27	6,535 - 6,895	1.000
Cloud Properties	28	7,175 - 7,475	1.000
Ozone	29	8,400 - 8,700	1.000
Surface/Cloud Temperature	30	9,580 - 9,880	1.000
	31	10,780 - 11,280	1.000
Cloud Top Altitude	32	11,770 - 12,270	1.000
	33	13,185 - 13,485	1.000
	34	13,485 - 13,785	1.000
	35	13,785 - 14,085	1.000
	36	14,085 - 14,385	1.000

Aquestes imatges es combinen per obtenir diversos productes derivats, agrupats segons la seva temàtica: atmosfera, sòl, criosfera o oceans. Dins del grup de productes referents al sòl, hi ha els que es centren en els índexs de vegetació (Taula 3).

Taula 3. Productes d'índexs de vegetació del sensor MODIS.

Producte	MODIS Terra	MODIS Aqua
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m	MOD13Q1	MYD13Q1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m	MOD13A1	MYD13A1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km	MOD13A2	MYD13A2
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C1	MYD13C1
Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km	MOD13A3	MYD13A3
Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C2	MYD13C2

De tots els productes disponibles, l'escollit per a la realització d'aquest treball és el MOD13Q1, ja que és el que compta amb una resolució espacial més alta, un aspecte molt important degut a la reduïda àrea d'estudi que es contempla, i que és del que se'n disposa una sèrie temporal més àmplia, des del 18 de febrer de 2000 fins a l'actualitat.

4. Dades

Les dades fonamentals per dur a terme l'anàlisi en qüestió són l'índex de vegetació, en aquest cas l'Índex de Vegetació de Diferència Normalitzada (NDVI), i les dades climàtiques, concretament, de precipitació i temperatura.

També s'han utilitzat les cobertes del sòl, no com a dada d'anàlisi però sí com a màscara per acotar els resultats a les classes de sòl adequades.

4.1. Índex de vegetació NDVI MOD13Q1 v006

El producte MOD13Q1 s'estructura com un Scientific DataSet (SDS, per les seves sigles en anglès), un conjunt de capes d'informació relacionades i les seves metadades, contingudes en un arxiu en format HDF-EOS. Concretament conté 12 capes (Taula 4), entre elles els índexs de vegetació, les bandes originals necessàries per al seu càlcul, i altres capes amb dades addicionals i índexs de qualitat. Per a més informació sobre el producte MOD13Q1 es pot consultar la pàgina web <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>.

Taula 4. Capes del producte MOD13Q1.

Capa	Descripció	Unitats	Tipus de dades	Fill Value	No Data Value	Rang de valors	Factor d'escala
250m 16 days NDVI	16 day NDVI	NDVI	16-bit signed integer	-3.000	N/A	-2.000 to 10.000	0,0001
250m 16 days EVI	16 day EVI	EVI	16-bit signed integer	-3.000	N/A	-2.000 to 10.000	0,0001
250m 16 days VI Quality	VI quality indicators	Bit Field	16-bit unsigned integer	65.535	N/A	0 to 65.534	N/A
250m 16 days red reflectance	Surface Reflectance Band 1	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days NIR reflectance	Surface Reflectance Band 2	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days blue reflectance	Surface Reflectance Band 3	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days MIR reflectance	Surface Reflectance Band 7	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days view zenith angle	View zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10.000	N/A	0 to 18.000	0,01
250m 16 days sun zenith angle	Sun zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10.000	N/A	0 to 18.000	0,01
250m 16 days relative azimuth angle	Relative azimuth angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-4.000	N/A	-18.000 to 18.000	0,01
250m 16 days composite day of the year	Day of year VI pixel	Julian day	16-bit signed integer	-1	N/A	1 to 366	N/A
250m 16 days pixel reliability	Quality reliability of VI pixel	Rank	8-bit signed integer	-1	N/A	0 to 3	N/A

Els dos índexs de vegetació disponibles són:

- Índex de Vegetació de Diferència Normalitzada (NDVI)
- Índex de Vegetació Millorat (EVI)

L'índex que s'ha utilitzat per a la realització del treball és l'NDVI, ja que és el més utilitzat en el camp de la teledetecció, i que permet diferents aplicacions com el seguiment de les condicions

Anàlisi fenològic de la vegetació amb sèries temporals d'NDVI a Catalunya i la seva relació amb el canvi climàtic

de la coberta vegetal a escala global, estudis de desforestació, desertització, detecció d'incendis, caracterització de biomes a escala global, prevenció de sequera i risc d'incendis forestals a partir de l'anàlisi de sèries multitemporals. L'EVI és una optimització de l'NDVI que aporta millores en la sensibilitat en les zones amb alta densitat de biomassa i redueix la influència de l'atmosfera.

L'NDVI és una normalització entre els valors de reflectància de l'infraroig proper i el vermell (Rouse et al. 1974). Es calcula mitjançant l'expressió:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

on ρ_{NIR} = reflectància infraroig proper (B2)

ρ_{Red} = reflectància vermell (B1)

El valors de l'índex NDVI estan compresos entre -1 i 1, distribuïts de tal manera:

- < 0 Zones amb aigua o neu
- 0 – 0,2 Terrenys sense vegetació
- 0,3 – 1 Zones amb vegetació més o menys densa

L'NDVI representat en les imatges utilitzades és el resultat de la composició dels valors obtinguts durant 16 dies. Per obtenir aquests valors s'apliquen els algorismes Maximum Value Composite i Constrained View angle - Maximum Value Composite (MVC i CV-MVC, per les seves sigles en anglès), que a l'hora de definir el valor final per a cada píxel tenen en compte els següents factors:

- Els valors d'NDVI màxims obtinguts en la sèrie
- Factors de qualitat de la imatge (contaminació atmosfèrica o presència de núvols)
- Proximitat dels píxels al nadir (distorsió)

A causa de que el tipus de dades de les imatges MOD13Q1 és de 16 bits amb signe (de -32.768 a 32.767), els valors digitals de l'NDVI es representen escalats per ajustar-se al tipus de dades. Per tant, el rang de valors útils de les imatges és de -2.000 a 10.000 (Figura 4).

Les imatges originals s'ofereixen amb un àmbit geogràfic de 1.200 km × 1.200 km (4.800 × 4.800 píxels de 250 m) i amb una projecció equivalent sinusoïdal (SIN) pròpia de les imatges MODIS.

Alternativament es poden descarregar les imatges preprocessades, ajustades a les necessitats de cada cas. D'aquesta manera, s'ha pogut descarregar tota la sèrie temporal completa (de l'any 2000 al 2018), seleccionant només la capa d'NDVI, ajustada a l'àrea d'estudi, en format TIFF i amb referència al datum WGS84. L'àmbit geogràfic de 3,33° de longitud i 2,50° de latitud correspon a unes imatges de 1.600 × 1.200 píxels de 0,0020833° de resolució espacial, equivalents a 200 m.

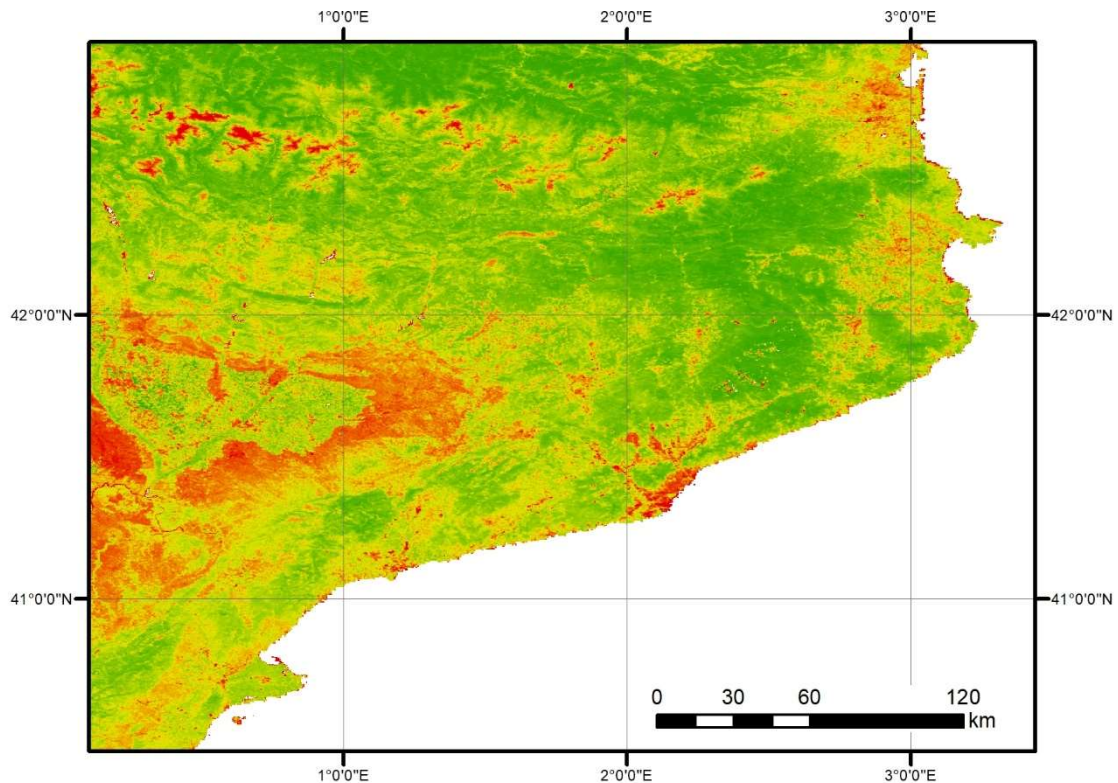
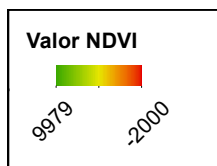


Figura 4. Exemple de dades d'NDVI MOD13Q1 v006.



La nomenclatura de les imatges utilitzades és la següent:

MOD13Q1.006__250m_16_days_NDVI_doyYYYYDDD_aid####.tif

on	MOD13Q1	Producte MODIS
	006	Versió
	250m_16_days_NDVI	Capa
	DoyYYYYDDD	Data d'inici d'observació (any i dia julià)
	aid####	Identificador de l'àrea de descàrrega
	tif	Format de l'arxiu

Les imatges MOD13Q1 originals es poden descarregar, conjuntament amb les metadades corresponents, des del visor EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del Servei Geològic dels Estats Units (USGS, per les seves sigles en anglès). Les imatges preprocessades amb les que s'ha treballat s'han de descarregar des de l'aplicació AppEEARS (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>), gestionada pel mateix USGS.

4.2. Dades climàtiques Spain02 v5

El projecte Spain05 és portat a terme pel Grup de Meteorologia de Santander, de la Universitat de Cantàbria (UC), en col·laboració amb la Agència Estatal de Meteorologia (AEMET). Consisteix en la creació d'una graella de 0,1° (± 10 km) que cobreix l'Espanya peninsular i les Illes Balears, on s'hi mostra la informació diària de precipitació (Figura 5) i temperatura ambiental (Figura 6) de 2.756 estacions meteorològiques de tot el país.

En l'última versió de Spain05 (v5) hi ha disponibles les dades des de 1951 fins a 2015, pel que l'estudi de la correlació entre la vegetació i les dades climàtiques no s'ha pogut realitzar fins a 2018, tal com estava previst.

Les dades es poden descarregar des del portal web del projecte (<http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>), en format NetCDF. Cada arxiu conté totes les imatges diàries per a cada variable.

4.2.1. Dades de precipitació

Les dades de precipitació provenen de la interpolació de les lectures diàries (de les 7:00h a les 7:00h) d'unes 2.500 estacions meteorològiques.

La informació que contenen s'expressa en mm.

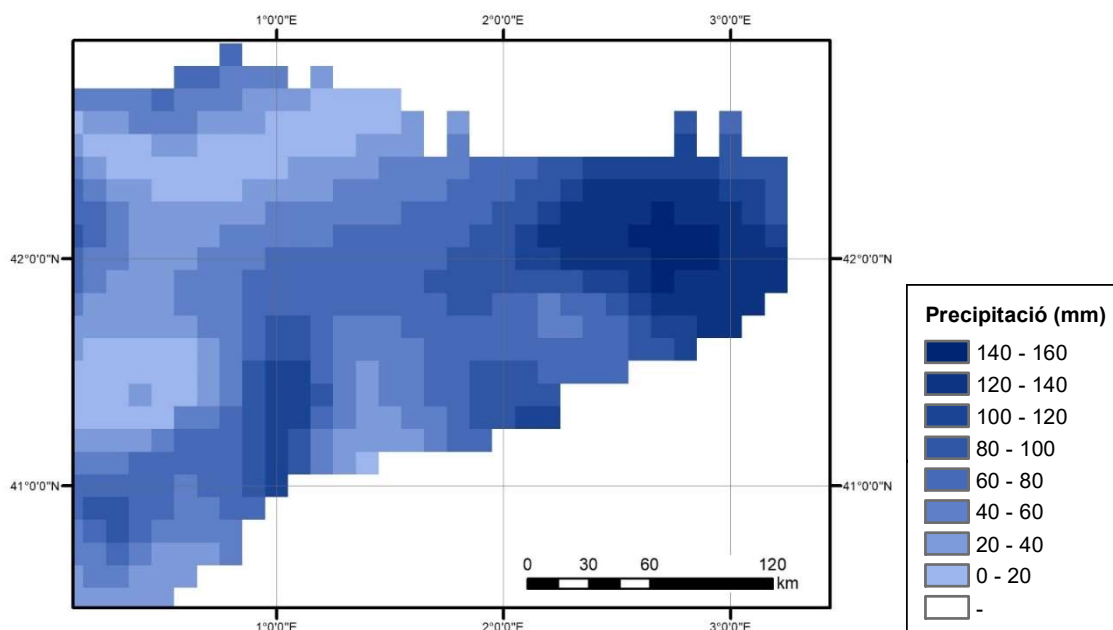


Figura 5. Exemple de dades de precipitació Spain02 v5.

4.2.2. Dades de temperatura

Les dades de temperatura s'interpolen a través de les lectures diàries d'unes 250 estacions meteorològiques.

En aquest cas hi ha disponibles 3 sèries, corresponents a la temperatura màxima, mínima i mitjana, en °C.

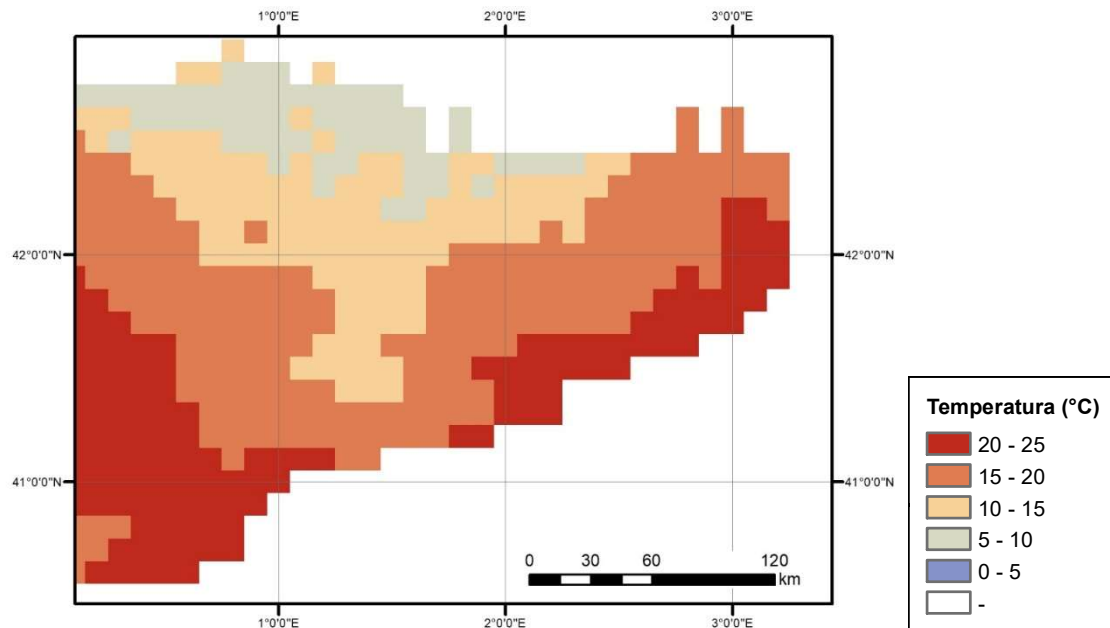


Figura 6. Exemple de dades de temperatura Spain02 v5.

4.3. Cobertes del sòl MCD12Q1 v006

Les cobertes del sòl s'han extret d'un altre producte MODIS, el MCD12Q1, que es troba a dins del grup de productes referents al sòl, com el MOD13Q1. L'arxiu descarregable està en format HDF-EOS i també s'estructura com un SDS que conté 13 capes, com 5 classificacions diferents de cobertes del sòl, una d'usos del sòl, cobertes d'aigua o els índexs de qualitat. Es pot descarregar des de les mateixes plataformes que el MOD13Q1.

Les classificacions de cobertes del sòl disponibles són les següents:

- Tipus 1: International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)
- Tipus 2: University of Maryland (UMD)
- Tipus 3: Leaf Area Index (LAI)
- Tipus 4: BIOME-Biogeochemical Cycles (BGC)
- Tipus 5: Plant Functional Types

La classificació utilitzada ha sigut la IGBP, i compta amb 17 classes o tipologies de coberta (Taula 5). Es va crear a partir d'una sèrie mensual d'NDVI amb resolució espacial d'1 km², generada a partir de les dades obtingudes pel sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, per les seves sigles en anglès) de la NOAA, entre els anys 1992 i 1993 (Loveland et al. 2000).

Taula 5. Tipologies de la classificació IGBP.

Nom	Valor	Descripció
Evergreen Needleleaf Forests	1	Dominated by evergreen conifer trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Evergreen Broadleaf Forests	2	Dominated by evergreen broadleaf and palmate trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Deciduous Needleleaf Forests	3	Dominated by deciduous needleleaf (larch) trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Deciduous Broadleaf Forests	4	Dominated by deciduous broadleaf trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Mixed Forests	5	Dominated by neither deciduous nor evergreen (40-60% of each) tree type (canopy >2m). Tree cover >60%.
Closed Shrublands	6	Dominated by woody perennials (1-2m height) >60% cover.
Open Shrublands	7	Dominated by woody perennials (1-2m height) 10-60% cover.
Woody Savannas	8	Tree cover 30-60% (canopy >2m).
Savannas	9	Tree cover 10-30% (canopy >2m).
Grasslands	10	Dominated by herbaceous annuals (<2m).
Permanent Wetlands	11	Permanently inundated lands with 30-60% water cover and >10% vegetated cover.
Croplands	12	At least 60% of area is cultivated cropland.
Urban and Built-up Lands	13	At least 30% impervious surface area including building materials, asphalt, and vehicles.
Cropland/Natural Vegetation Mosaics	14	Mosaics of small-scale cultivation 40-60% with natural tree, shrub, or herbaceous vegetation.
Permanent Snow and Ice	15	At least 60% of area is covered by snow and ice for at least 10 months of the year.
Barren	16	At least 60% of area is non-vegetated barren (sand, rock, soil) areas with less than 10% vegetation.
Water Bodies	17	At least 60% of area is covered by permanent water bodies.
Unclassified	255	Has not received a map label because of missing inputs.

Les imatges són de 8 bits (Figura 7), essent el rang de valors útils de 1 a 17 per a les diferents classes i el valor 255 per als píxels no classificats. Les imatges originals tenen un àmbit geogràfic de 1.200 km × 1.200 km (2.400 × 2.400 píxels de 500 m).

Tot i que hi ha dades disponibles des de l'any 2001 fins a l'actualitat, amb una periodicitat anual, per a aquest projecte només s'ha utilitzat la imatge corresponent a l'any 2018, descarregada en format TIFF, amb referència al datum WGS84 i amb el mateix àmbit geogràfic que les dades MOD13Q1. La mida de la imatge és de 800 × 600 píxels de 0,0041667° de resolució espacial, equivalents a 400 m, però posteriorment s'ha remostrejat per adaptar-la a la resolució espacial de les dades d'NDVI.

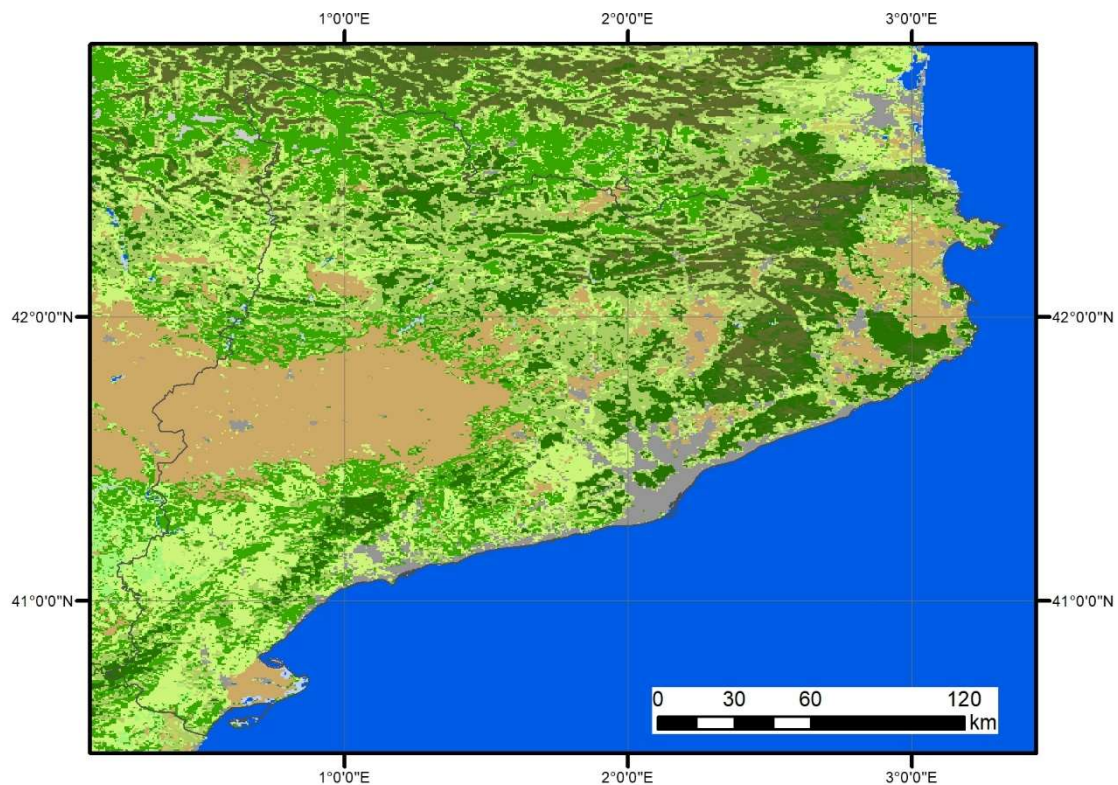


Figura 7. Cobertes del sòl MCD12Q1 v006 Tipus 1: IGBP (2018).

Cobertes del sòl		
Evergreen Needleleaf Forests	Open Shrublands	Croplands
Evergreen Broadleaf Forests	Woody Savannas	Urban and Built-up Lands
Deciduous Broadleaf Forests	Savannas	Cropland/Natural Vegetation Mosaics
Mixed Forests	Grasslands	Barren
Closed Shrublands	Permanent Wetlands	Water Bodies

Les classes considerades com a vàlides per a l'anàlisi fenològic han estat les compreses entre la 1 i la 10, és a dir, les que representen les zones boscoses amb una cobertura d'arbres superior al 60%, les zones arbrades amb una cobertura inferior al 60%, els matollars i els prats herbacis. Les zones de conreu no s'han tingut en compte, ja que s'ha considerat que en aquestes, l'estacionalitat o la simple existència de vegetació ve marcada per l'ésser humà, no per fenòmens naturals. Evidentment, àrees urbanes, zones amb neu o gel permanent i zones cobertes d'aigua tampoc s'han considerat.

Per a més informació sobre el producte MCD12Q1 es pot consultar la pàgina web <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>.

5. Metodologia

En aquest apartat es detallen els diferents passos que s'han realitzat per tal d'assolir els resultats desitjats.

Els primers passos s'han centrat en el preprocessat de les imatges d'NDVI inicials per adaptar-les a les necessitats de partida. Els següents s'han estructurat en funció dels tres anàlisis diferents que es contemplen en el projecte, amb una preparació inicial de les dades i un càlcul final:

- Tendència de l'estacionalitat de la vegetació entre els anys 2001 i 2017
- Tendència de l'estat general de la vegetació entre els anys 2000 i 2018
- Correlació entre la vegetació i les dades climàtiques entre els anys 2000 i 2015

5.1. Preparació de la sèrie inicial d'imatges d'NDVI

Per poder realitzar un estudi entre l'any 2000 i el 2018, evidentment, han estat necessàries les imatges que cobreixen totalment els 19 anys. Addicionalment, per l'execució d'un pas posterior que consisteix en el canvi de periodicitat de les imatges, també s'ha necessitat l'última corresponent a l'any 1999 i la primera del 2019. El fet que les imatges siguin composicions de 16 dies fa que es disposi de 23 imatges per a cada any, amb un total de 439 per a la sèrie estudiada.

Com que només es disposa d'imatges MOD13Q1 des del 18 de febrer de 2000, les 4 primeres imatges de la sèrie temporal s'han hagut d'extrapolar mitjançant les disponibles d'anys posteriors. S'ha prioritzat l'opció de comptar amb un any més de dades per sobre de la d'eliminar l'any 2000 de la sèrie, ja que s'ha considerat que la extrapolació de només 4 imatges en una sèrie de 439 no afectaria als resultats obtinguts.

Així doncs, les imatges amb data d'inici d'observació en el dia julià 353 de 1999 i els dies 1, 17 i 33 de 2000 s'han extrapolat en base al càlcul de la mitjana de les imatges corresponents als mateixos dies dels 10 anys posteriors, mitjançant una calculadora ràster.

L'altre pas previ a realitzar ha sigut el canvi de nomenclatura. Per treballar amb sèries temporals és indispensable que la data a la que correspon cada arxiu o imatge estigui continguda en el nom de l'arxiu. Això ja es complia en les imatges descarregades des d'AppEEARS, però ha sigut necessari un canvi en el format de la pròpia data, per passar de YYYYDDD a YYYYMMDD.

També cal tenir en compte que, en funció del software utilitzat en cada pas, s'han hagut de fer diversos canvis de format de les imatges, el que en cap cas ha afectat a la informació que contenen.

5.2. Aplicació del filtre temporal

A causa de la composició de diferents observacions amb la que es construeixen les imatges MOD13Q1, es pot apreciar certa disparitat entre píxels contigus. Per aquest motiu s'ha cregut necessària l'aplicació d'un filtre temporal per tal de minimitzar el soroll existent en les imatges originals. Aquest tipus de filtres, com el seu nom indica, no treballen en base als valors dels píxels

Anàlisi fenològic de la vegetació amb sèries temporals d'NDVI a Catalunya i la seva relació amb el canvi climàtic

veïns dins de la mateixa imatge, sinó que ho fan en base als valors del mateix píxel en altres imatges dins d'una sèrie temporal (Mas 2011).

S'ha aplicat el filtre temporal de la mitjana (Figura 8), que es basa en el càlcul de la mitjana aritmètica dels valors digitals de x imatges anteriors i posteriors a cada imatge central. En aquest cas s'ha utilitzat una finestra temporal de valor 3, pel que els valors de les imatges resultants s'han determinat per la mitjana de 3 imatges (la central, la anterior i la posterior).

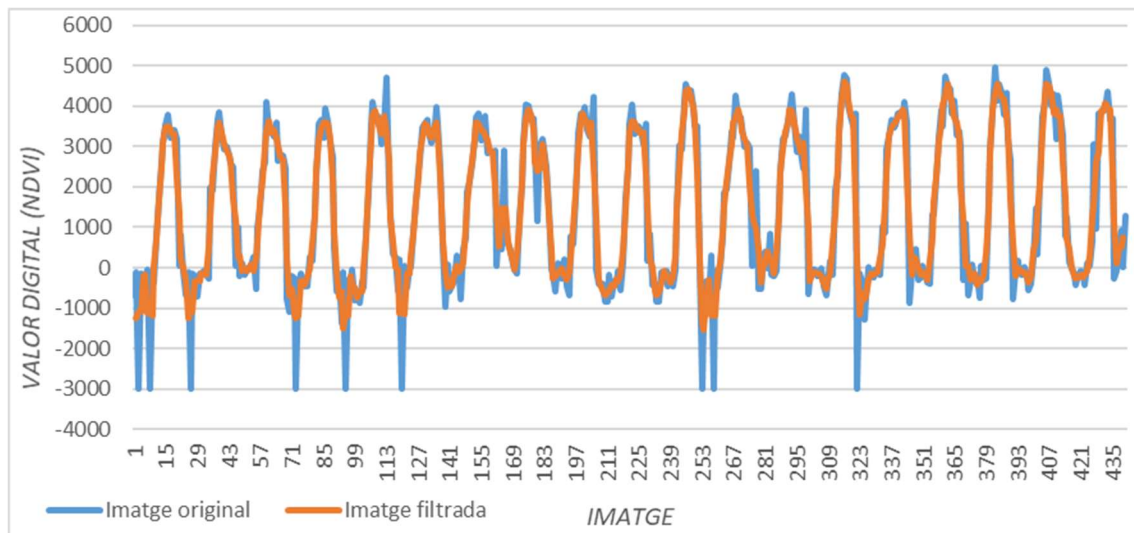


Figura 8. Comparació entre els valors digitals de les imatges originals i les filtrades (filtre temporal de la mitjana).

5.3. Tendència de l'estacionalitat de la vegetació

La finalitat d'aquest càlcul ha sigut determinar el cicle de l'estació de creixement de la vegetació en funció dels valors d'NDVI d'una sèrie temporal d'imatges. L'estació de creixement està definida per un moment inicial, a partir del qual es produeix un increment del valor d'NDVI fins assolir un punt màxim, i un posterior descens fins a arribar als valors inicials, en el que es considera el final de l'estació.

Amb la temporalitat de l'estació per a cada any de la sèrie s'ha pogut calcular la tendència d'aquesta en el temps, és a dir, si s'ha avançat o endarrerit el seu inici, o si ha incrementat o disminuït la seva durada.

5.3.1. Canvi de periodicitat de les dades

Les imatges resultants de l'aplicació del filtre temporal mantenen la periodicitat de 16 dies, com les imatges originals. L'algoritme que calcula l'estacionalitat de la vegetació en el pas següent requereix que les dades tinguin una periodicitat de 10 dies, o dècades. Per obtenir les noves imatges, el software utilitzat interpola els valors digitals d'aquestes a partir dels de les imatges d'entrada. D'aquesta manera s'ha passat de les 23 imatges anuals a 36, i el total de la sèrie ha passat de 439 a 684.

5.3.2. Càlcul de l'estacionalitat de la vegetació

Per calcular la tendència de l'estacionalitat, primer s'ha d'obtenir l'estacionalitat corresponent a cada any de la sèrie temporal. Per a cada any d'estudi, o central, l'algoritme requereix les dades de l'any anterior i el posterior sencers. Per aquest motiu, amb les dades disponibles entre els anys 2000 i 2018, només s'han pogut obtenir resultats per als anys 2001 a 2017. L'algoritme de càlcul segueix el següent procediment:

- Determina els valors d'NDVI màxim (Y_{max}) i mínim (Y_{min}) per a cada píxel en cada any.
- Elimina els píxels sense estacionalitat, en funció de 3 valors clau (x , y , z):
 - si $Y_{max} < x$ → deserts
 - si $Y_{min} > y$ → vegetació permanent
 - si $(Y_{max} - Y_{min}) < z$ → baixa variació
- Aplica un filtre de suavitzat als píxels restants per obtenir-ne la gràfica que conté tots els cicles del període (estacions).
- Cada cicle està format per un segment ascendent i un descendent. Tot i la utilització del filtre de suavitzat, en cada any s'hi poden detectar varis cicles. Mitjançant diferents tests addicionals, s'eliminen els cicles menys rellevants fins a deixar-ne un.

D'aquesta manera s'han definit les estacions de creixement que segueix la vegetació. S'han generat 4 imatges per a cada any, que representen els següents factors:

- Inici de l'estació de creixement
- Final de l'estació de creixement
- Durada de l'estació de creixement
- Punt màxim de l'estació de creixement

Els valors de les imatges sortida són dècades, com a les imatges d'entrada. El rang de valors útils per a l'inici, final i punt màxim de l'estació és de 1 a 108, que representen les 36 dècades de l'any central (37-72), així com les de l'any anterior (1-36) i posterior (73-108). Això és degut a que les estacions corresponents a un any concret poden començar o acabar en l'any anterior i posterior respectivament. Pel que fa a la durada de l'estació, el rang és de 1 a 36, ja que una estació mai podrà durar més d'un any.

Per poder calcular la tendència d'aquests 4 factors ha sigut necessària una reclassificació de les imatges d'inici (Figura 9), final (Figura 10) i punt màxim. Aquesta reclassificació ha consistit en eliminar els valors dels anys anterior i posterior i traslladar els valors de l'any en qüestió al rang de 1 a 36.

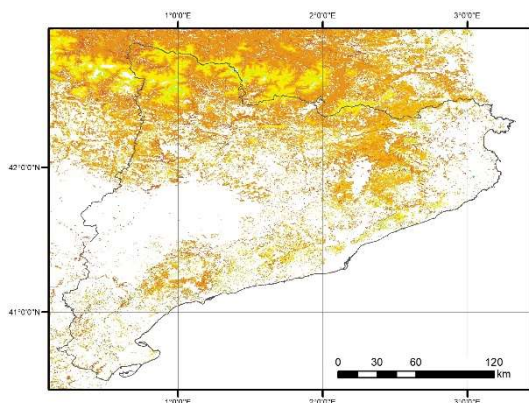


Figura 9. Inici de l'estació (2010).

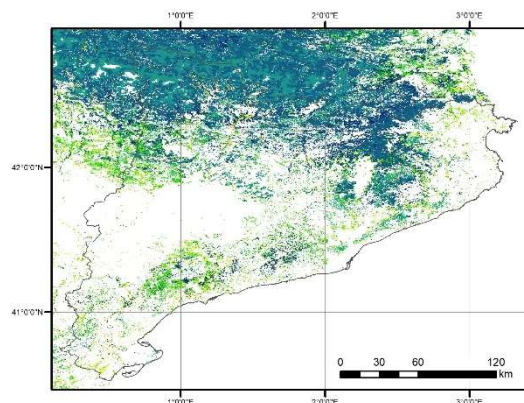


Figura 10. Final de l'estació (2010).

Mes			
Gener	Abril	Juliol	Octubre
Febrer	Maig	Agost	Novembre
Març	Juny	Setembre	Desembre

5.3.3. Càlcul de la tendència de l'estacionalitat de la vegetació

El càlcul de la tendència d'una variable, en aquest cas l'estacionalitat de la vegetació, es basa en la determinació de la relació entre aquesta variable i el temps, essent aquesta última la variable independent. En aquest cas, la relació no és lineal, de manera que no s'han pogut utilitzar paràmetres com el coeficient de correlació de Pearson (r) o el coeficient de determinació (r^2), explicats i utilitzats en altres apartats.

Per calcular la tendència s'ha utilitzat l'estimador no paramètric Theil-Sen. És un sistema robust respecte a les sèries curtes o amb molt soroll (Hoaglin et al. 2000). Es basa en el càlcul dels pendents de cada píxel en funció del temps, analitzant tots els possibles parells dins del període de temps. El nombre màxim de pendents calculats per a cada píxel és de $n(n-1)/2$, on n és el nombre de imatges disponibles, essent el valor resultant la mediana de tots ells (Neeti & Eastman 2011). En aquest cas, disposant de 17 anys de dades anuals, l'estimador ha calculat 136 pendents per a cada píxel.

El grau de significació estadística del pendent Theil-Sen s'avalua amb el coeficient de correlació de Mann-Kendall (Neeti & Eastman 2011). El primer pas es calcular el paràmetre S , amb la següent equació:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_i - x_j)$$

on

$$\text{signe}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_i - x_j) < 0 \\ 0 & \text{si } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_i - x_j) > 0 \end{cases}$$

Els valors de cada píxel es comparen amb els anteriors en funció del temps. S pren el valor inicial 0, de manera que si un valor es més alt que l'anterior, S incrementa en 1, i si és menor, disminueix en 1, i així fins a contemplar tots els parells de píxels possibles a la sèrie. Un valor final positiu i alt indica una tendència creixent, i un de negatiu i alt indica tendència decreixent. Els valors de S baixos, tant positius com negatius, indiquen una absència de tendència.

Amb S es pot calcular el coeficient de correlació de Mann-Kendall o Tau-Kendall (τ). Tenint en compte que el nombre màxim de parells avaluats ve donat per l'expressió $n(n-1)/2$, τ només pot prendre valors entre -1 i 1 (Helsel & Frans 2006).

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

on n = nombre de dades en funció del temps

Finalment es calcula el nivell de significació estadística de τ , el que ens donarà la certesa de l'existència o no de tendència en l'estacionalitat. Partint de la hipòtesi nul·la (H_0), que indica que no hi ha tendència, es calcula el valor p , o el valor crític Z equivalent segons la taula de la

distribució normal, a partir del qual es rebutja la hipòtesi nul·la i s'accepta l'alternativa. El valor Z del paràmetre S ve donat per l'expressió:

$$Z_S = \frac{S-1}{\sigma_S} \quad \text{si } S > 0$$

$$Z_S = 0 \quad \text{si } S = 0$$

$$Z_S = \frac{S+1}{\sigma_S} \quad \text{si } S < 0$$

on $\sigma_S = \sqrt{(n/18)(n-1)(2n+5)}$

La hipòtesi nul·la es rebutja quan $|Z_S| > Z$, essent Z el valor de la distribució normal amb un nivell de significació $\alpha/2$ (Lamprey 2008). Llavors, es confirma que:

- si $|Z_S| > Z$ i $Z_S > 0 \rightarrow$ hi ha tendència creixent
- si $|Z_S| > Z$ i $Z_S < 0 \rightarrow$ hi ha tendència decreixent
- si $|Z_S| < Z \rightarrow$ no hi ha tendència

El càlcul de la tendència s'ha efectuat sobre dades que reflecteixen temps, concretament, la dècada de l'any en la que comença o acaba l'estació de creixement de la vegetació o la dècada en la que experimenta el seu punt màxim, de manera que una tendència creixent o decreixent s'ha d'interpretar com un endarreriment o avançament, respectivament, d'aquests fets. Pel que fa a la durada de l'estació, el que s'ha analitzat és si aquesta s'amplia o es redueix.

5.4. Tendència de l'estat general de la vegetació

L'objectiu d'aquest apartat ha sigut el de calcular la tendència de l'estat general de la vegetació, o sigui, la presència o no d'aquesta al llarg del temps en base als valors d'NDVI, per poder definir si el seu estat ha millorat o empitjorat.

5.4.1. Agrupació temporal de les dades

Aquest pas s'ha executat amb les imatges resultants de l'aplicació del filtre temporal. Les imatges d'NDVI, amb una periodicitat de 16 dies, s'han hagut d'agrupar en períodes mensuals, per finalment agrupar-les en períodes anuals. L'agrupació ha consistit en la generar noves imatges en funció de les periodicitat escollida, i s'ha assignat a cada píxel el valor màxim dels píxels corresponents de les imatges agrupades. El càlcul s'ha pogut realitzar per als anys compresos entre el 2000 i el 2018, obtenint així les 19 imatges anuals.

5.4.2. Càlcul de la tendència de l'estat general de la vegetació

Els càlculs necessaris per a la determinació de la tendència general de la vegetació han consistit en la determinació dels mateixos paràmetres estadístics que s'han utilitzat per a l'estacionalitat és a dir, l'estimador no paramètric Theil-Sen, el paràmetre S , el coeficient de correlació de Mann-Kendall o Tau-Kendall τ i el nivell de significació Z_S .

En aquest cas, la tendència creixent o decreixent s'ha d'interpretar com la millora o empitjorament de l'estat de la vegetació, ja que la tendència es calcula sobre les dades d'NDVI.

5.5. Correlació entre la vegetació i les dades climàtiques

En aquest apartat s'ha calculat la correlació que hi ha entre l'estat de la vegetació, definit per els valors de l'índex NDVI, i dues tipologies de dades climàtiques fonamentals, la precipitació i la temperatura, per avaluar l'efecte que tenen aquestes últimes sobre la vegetació.

5.5.1. Preparació de les dades climàtiques

Per poder calcular la correlació entre les dades de vegetació i les dades climàtiques, aquestes últimes s'han hagut d'adaptar a les primeres.

Un cop extretes del format original, les imatges amb la informació diària per als anys 2000 a 2015 de les estacions meteorològiques s'han hagut de remostrejar. D'aquesta manera s'ha passat d'uns píxels de 0,1° a 0,0020833° de resolució espacial, el que representa una relació de 1/48.

Finalment les imatges també s'han agrupat en períodes mensuals. Per a les dades de precipitació s'ha efectuat una agrupació on el valor resultant de cada píxel ha sigut la suma de tots els valors del període, per tal de reflectir la quantitat total d'aigua caiguda sobre la zona cada mes. Pel que fa a les dades de temperatura s'ha optat per calcular la mitjana dels totes les lectures del període, tant per a la temperatura màxima, la mínima i la mitjana, obtenint així els valors més representatius del mes. La total de dades climàtiques resultant ha consistit en 4 sèries de 192 imatges cadascuna.

5.5.2. Normalització de les dades

Per a l'últim pas de l'estudi, la determinació de la correlació entre les dades de vegetació i les dades climàtiques, ha sigut necessària normalització de les dades. Per això, s'han calculat les anomalies estandarditzades (z) en funció del temps amb l'expressió:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

on x = valor a estandarditzar

\bar{x} = mitjana del valor en el període de temps

σ = desviació estàndard en el període de temps

Aquest càlcul s'ha realitzat per a les dades d'NDVI, precipitació i temperatures (màxima, mínima i mitjana) agrupades mensualment i per al període comprès entre els anys 2000 i 2015.

5.5.3. Càlcul de la correlació entre la vegetació i les dades climàtiques

La correlació entre la vegetació i la precipitació o la temperatura s'ha determinat mitjançant el càlcul de la regressió lineal entre les diferents variables.

La regressió lineal permet estudiar la relació entre dues variables, sempre que aquesta sigui lineal, considerant una de les variables com a independent (representada en l'eix d'abscisses x) i l'altra com a dependent (representada en l'eix d'ordenades y). D'aquesta manera es busca una

recta que mostri el menor error possible respecte a la dispersió gràfica de les dades, mitjançant el mètode de mínims quadrats, i que permeti predir la variable dependent en funció de la independent (Wilks 2006). La recta es defineix per la següent equació:

$$y = a + bx$$

on x = valor de la variable independent

a = punt de tall en l'eix d'ordenades

b = pendent de la recta

El pendent mostra la relació entre les dues variables, essent aquesta positiva o negativa en funció del seu signe, però no reflecteix el grau d'aquesta relació. Per això, és necessària la normalització de les dades respecte al mateix període de temps, de manera que el pendent es converteix en el coeficient de correlació de Pearson (r), que ve determinat per la següent equació:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

on σ_{XY} = covariança entre les dues variables

σ_X = desviació estàndard de la variable independent

σ_Y = desviació estàndard de la variable dependent

Els valors de r es compreenen entre -1 i 1, de manera que un valor positiu indica una relació directa entre les dues variables (quan una augmenta l'altra també ho fa), un valor negatiu indica una relació inversa (quan una augmenta l'altra disminueix) i el valor 0 indica que no hi ha relació entre elles.

Finalment, el coeficient de determinació (r^2) mostra la proporció de la variació d'una variable dependent descrita per una altra independent. Els seus valors es compreenen entre 0 i 1, on 0 indica que no hi ha relació entre elles i 1, una relació total (Murphy 1995).

Així doncs, s'han calculat aquests paràmetres amb les imatges procedents de la normalització del pas anterior, prenent com a variable dependent l'NDVI i com a variables independents la precipitació i les temperatures.

Com a últim pas, per poder enfocar els resultats d'una manera similar als altres apartats, s'ha calculat el paràmetre t de cada cas. El paràmetre t es calcula amb la següent expressió:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

on r = coeficient de correlació de Pearson

r^2 = coeficient de determinació

n = nombre de dades

Amb el paràmetre t , s'ha pogut avaluar el nivell de significació estadística de les correlacions obtingudes.

6. Resultats

En aquest apartat s'interpreten els resultats obtinguts mitjançant els tres anàlisis realitzats sobre la vegetació de Catalunya.

El procediment que s'ha seguit en els tres apartats consisteix en l'aplicació de diferents màscares sobre les imatges resultants dels càlculs, i un anàlisi final de caire quantitatiu i zonal.

Cal comentar que la superfície total utilitzada com a referència per comparar els resultats obtinguts ha sigut la de les zones de l'àrea d'estudi que es corresponen amb les classes de cobertes del sòl que s'han adoptat com a vàlides. D'aquesta manera, camps de conreu, àrees urbanes, zones amb neu o gel permanent o cobertes d'aigua, així com una gran part de la imatge que correspon al mar Mediterrani no s'han tingut en compte. Així doncs, la superfície de referència utilitzada en l'anàlisi de les tendències ha sigut de 39.440 km², el que equival a 986.000 píxels. En el cas de l'anàlisi de les correlacions, la superfície de referència ha sigut de 31.280 km², corresponent a 782.000 píxels, degut a que només s'ha tingut en compte la superfície coincident amb l'àmbit geogràfic de les dades climàtiques. En aquest sentit també cal puntualitzar que la mida de píxel utilitzada per fer la conversió ha sigut de 200 m × 200 m. Tot i que la resolució espacial genèrica del format de les imatges és de 250 m, les imatges descarregades mostraven una altra resolució, pel que s'ha adoptat una mida de píxel aproximada per facilitar els càlculs.

6.1. Tendència de l'estacionalitat de la vegetació

Per analitzar la tendència de l'estacionalitat de la vegetació s'han tingut en compte quatre factors: inici, final, durada i punt de màxima vegetació. El període temporal d'anàlisi ha estat de 17 anys, o sigui, 16 períodes anuals entre l'any 2001 i el 2017. Els moments d'inici i final de l'estació de creixement i quan aquesta assoleix el seu punt màxim (valor d'NDVI) són esdeveniments puntuals i estan definits per una data concreta de l'any, mentre que la durada de l'estació, evidentment, equival a un període de temps.

Les imatges resultants del càlcul de les tendències de l'estacionalitat de la vegetació han sigut les següents:

- Pendent Theil-Sen: Expressa la tendència creixent o decreixent, és a dir, endarreriment o avançament, del moment en el que es produeix l'esdeveniment en qüestió, o l'increment o decrement de la durada de l'estació. Les unitats expressen les dècades, o períodes de 10 dies, en què varia la temporalitat de cada píxel cada any, tot i que a efectes de resultats s'han convertit a dies, per fer-los més entenedors.
- Nivell de significació estadística Z_s del coeficient de correlació de Mann-Kendall τ : Es correspon als valors de la taula de distribució normal.

Per obtenir unes imatges aptes per a l'anàlisi s'han aplicat dues màscares a les imatges del pendent, per tal de limitar l'estudi als píxels realment representatius per a la variable que ens afecta:

- Nivell de significació estadística: Per acotar el resultat als píxels on la tendència és estadísticament significativa, s'ha escollit un nivell de significació de $\alpha = 0,05$, que segons

la taula de distribució normal correspon a un valor $Z_s = \pm 1,96$. Per tant, els píxels amb una valor Z_s entre -1,96 i 1,96 s'han eliminat.

- Cobertes del sòl: S'han eliminat els píxels corresponents a les tipologies de cobertes del sòl definides com a no vàlides en l'apartat de descripció de les dades.

En els quatre casos, i un cop aplicades les màscares, el número de píxels significatius resultants ha sigut mínim. De mitjana, només resten per a l'anàlisi final aproximadament 50.000 píxels en cada imatge, totalment insuficients per poder determinar cap tipus de tendència a escala de tota Catalunya. A continuació es mostren els resultats, però no se'n fa cap anàlisi zonal, degut a la dispersió dels píxels disponibles. Les unitats dels valors representats a les imatges són dies.

6.1.1. Inici de l'estació de creixement

La imatge final (Figura 11) conté 54.008 píxels amb dades representatives, un 5,5% dels estudiats.

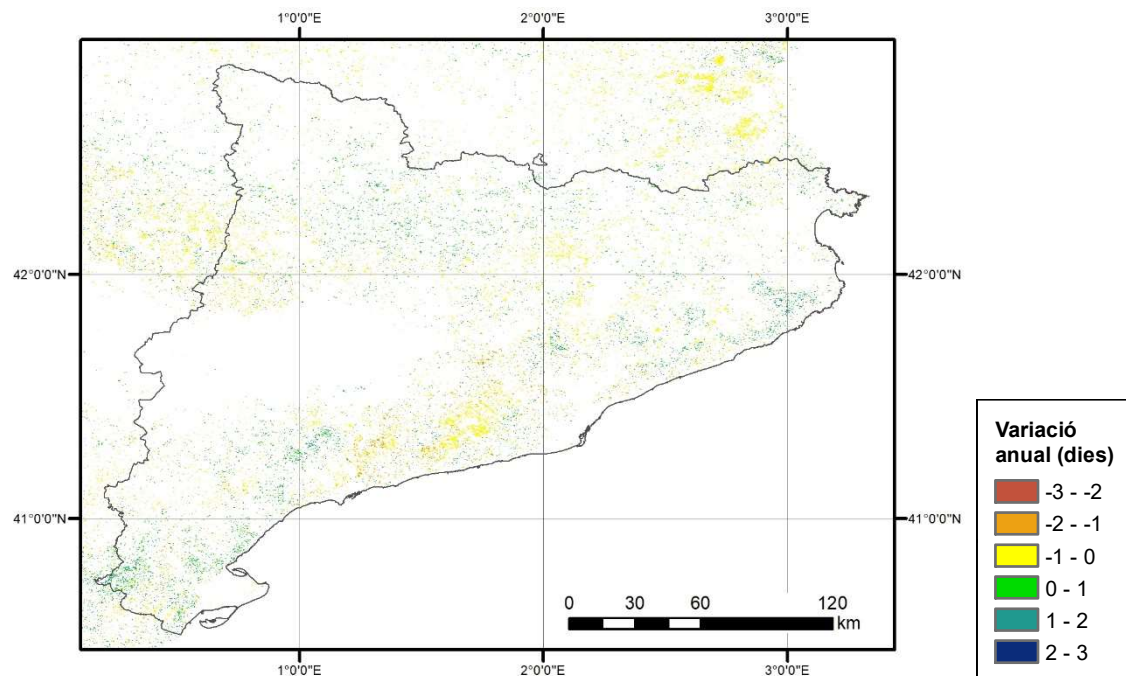


Figura 11. Tendència de l'inici de l'estació de creixement.

La tendència mostrada és negativa (Taula 6), amb un 3,6% dels píxels resultants indicant aquest fet. La mitjana d'avançament de l'inici de l'estació pel període de 16 anys ha estat de 15 dies en cada píxel.

Taula 6. Resultats de la tendència de l'inici de l'estació de creixement.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Tendència positiva	18.324	732,96	1,9%
Tendència negativa	35.684	1.427,36	3,6%
Total resultats	54.008	2.160,32	5,5%

*respecte la superfície estudiada

6.1.2. Final de l'estació de creixement

La imatge corresponent al final de l'estació (Figura 12) conté 44.044 píxels vàlids, un 4,5% dels estudiats.

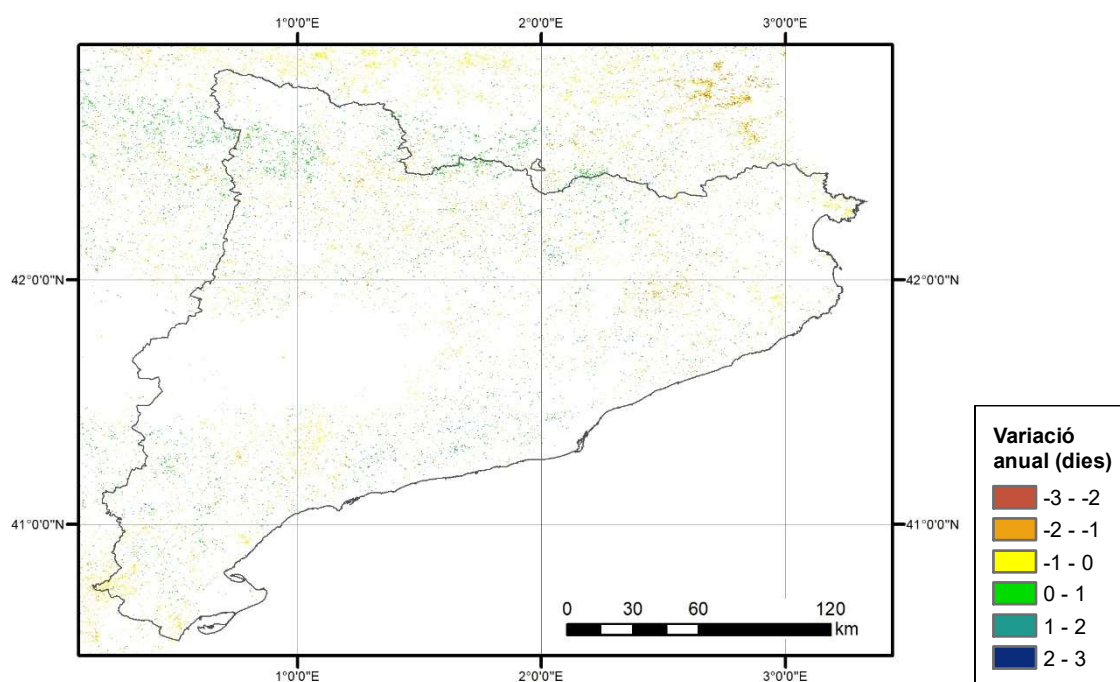


Figura 12. Tendència del final de l'estació de creixement.

La tendència també és negativa (Taula 7), però només amb el 3,0% del total de píxels. De mitjana, el final de l'estació s'ha avançat 40 dies en tot el període comptabilitzat.

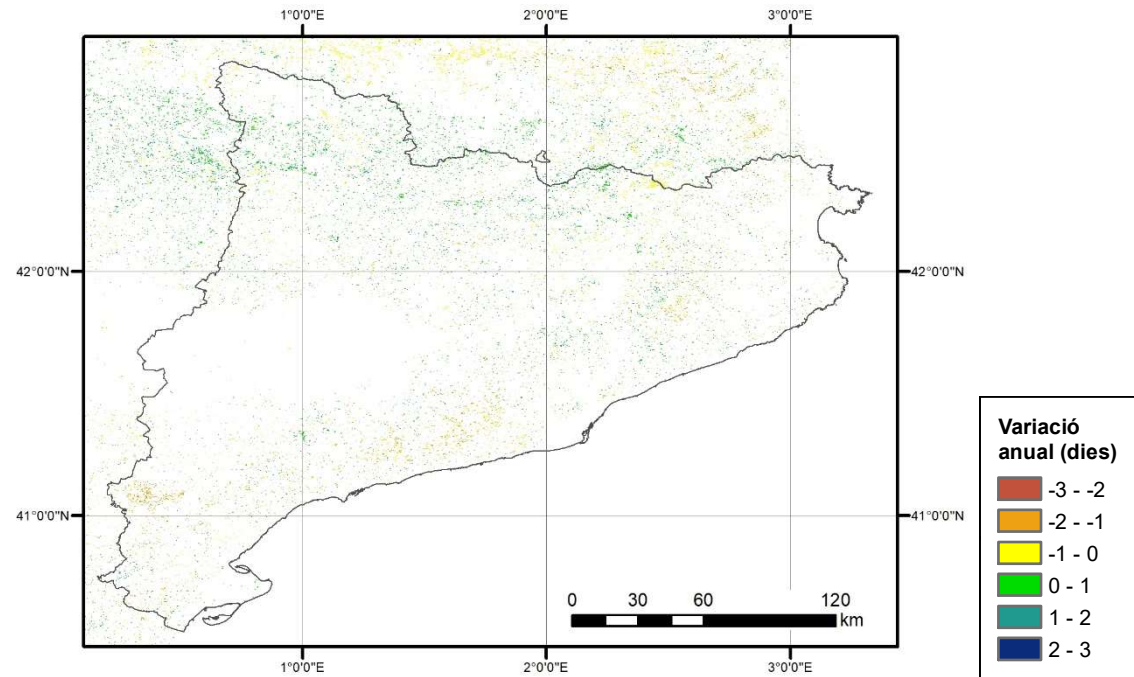
Taula 7. Resultats de la tendència del final de l'estació de creixement.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Tendència positiva	14.019	560,76	1,4%
Tendència negativa	30.025	1.201,00	3,0%
Total resultats	44.044	1.761,76	4,5%

*respecte la superfície estudiada

6.1.3. Durada de l'estació de creixement

En aquest cas la imatge (Figura 13) és la que conté menys píxels, 41.983, un 4,3% dels 986.000 estudiats.



La tendència (Taula 8) també és negativa (2,3% del píxels), el que és coherent amb les tendències de l'inici i el final de l'estacionalitat. De mitjana, l'estació s'ha escurçat 21 dies durant el període.

Taula 8. Resultats de la tendència de la durada de l'estació de creixement.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Tendència positiva	19.258	770,32	2,0%
Tendència negativa	22.725	909,00	2,3%
Total resultats	41.983	1.679,32	4,3%

*respecte la superfície estudiada

6.1.4. Punt màxim de l'estació de creixement

Finalment, la imatge que mostra el moment on es produeix el pic màxim de vegetació (Figura 14) mostra 59.242 píxels, el màxim dels valors obtinguts en els quatre apartats. Tot i així, aquesta dada només representa el 6,0% del total dels píxel estudiats.

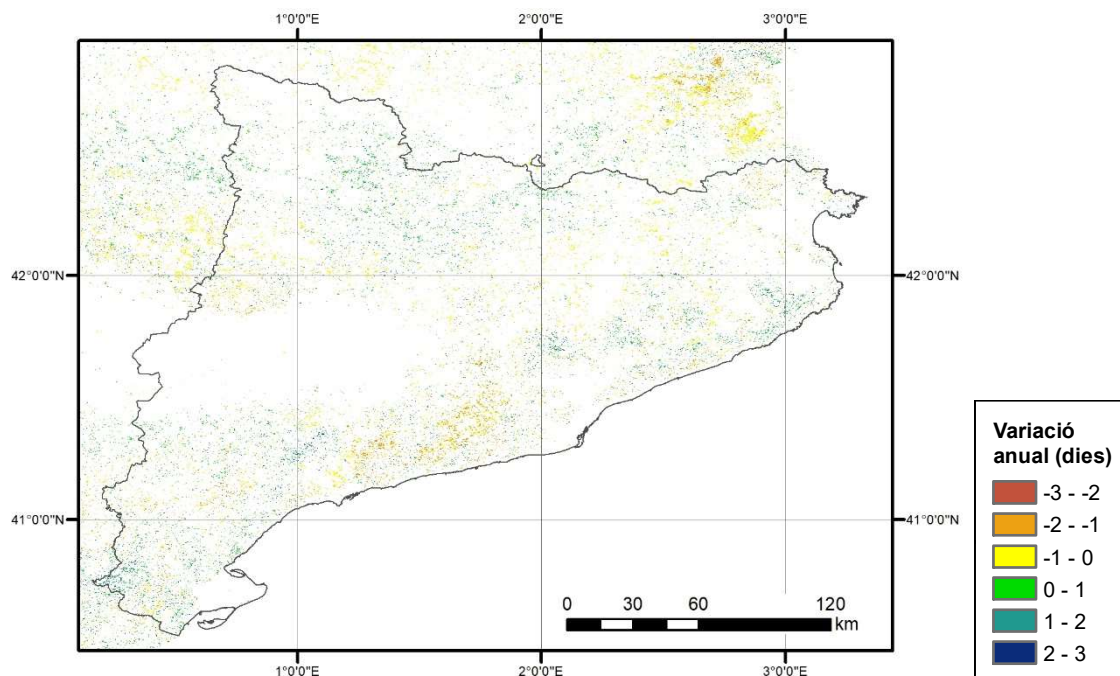


Figura 14. Tendència del punt màxim de l'estació de creixement.

De la mateixa manera que en els altres apartats, la tendència predominant és negativa (Taula 9), però només significa el 3,8% de la superfície total. El punt de màxima vegetació anual s'ha avançat 18 dies durant el període de 16 anys.

Taula 9. Resultats de la tendència del punt màxim de l'estació de creixement.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Tendència positiva	22.127	885,08	2,2%
Tendència negativa	37.115	1.484,60	3,8%
Total resultats	59.242	2.369,68	6,0%

*respecte la superfície estudiada

6.2. Tendència de l'estat general de la vegetació

L'estat general de la vegetació s'ha avaluat contemplant una sèrie temporal de 19 imatges corresponents als anys compresos entre el 2000 i el 2018, el que equival a un període de 18 anys.

Les imatges resultants del càlcul de la tendència han sigut les següents:

- Pendent Theil-Sen: Expressa la tendència creixent o decreixent de l'estat de la vegetació, en funció del signe dels valors. La unitat d'aquesta magnitud és la quantitat de valor d'NDVI en què varia cada píxel en cada un dels 18 salts de la sèrie temporal.
- Nivell de significació estadística Z_s del coeficient de correlació de Mann-Kendall τ : Es correspon als valors de la taula de distribució normal.

De la mateixa manera que en l'apartat anterior, s'han aplicat les màscares segons la significació estadística i les cobertes del sòl sobre les imatges resultants, mantenint el nivell de significació $\alpha = 0,05$ i les mateixes tipologies de sòl.

Finalment, els càlculs han proporcionat una imatge resultant (Figura 15) amb 489.897 píxels significatius dels aproximadament 986.000 que s'han tingut en compte en l'estudi, un 49,7%.

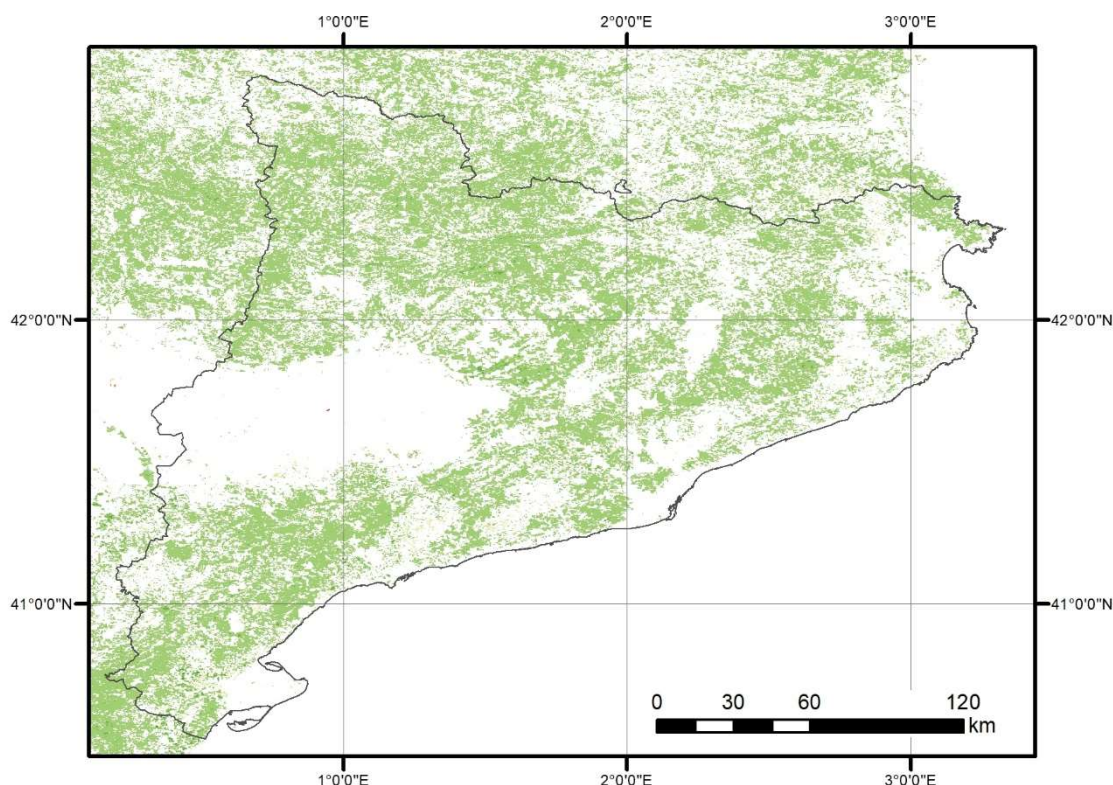
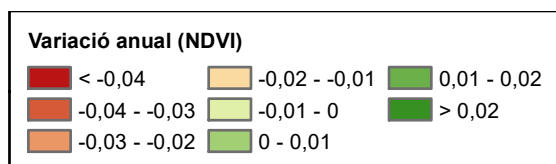


Figura 15. Tendència de l'estat general de la vegetació.



En general s'observa que la tendència és eminentment positiva (Taula 10). El 48,9% dels píxels estudiats mostren valors positius, el que representa una superfície de 19.278,56 km², respecte als 317,32 km² (0,8%) on la tendència és negativa. Per tant, en pràcticament la meitat de la zona estudiada es detecta una millora de l'estat de la vegetació, un resultat realment significatiu.

Taula 10. Resultats de la tendència de l'estat general de la vegetació.

	Núm. de píxels	Superfície (km²)	%*
Tendència positiva	481.964	19.278,56	48,9%
Tendència negativa	7.933	317,32	0,8%
Total resultats	489.897	19.595,88	49,7%

*respecte la superfície estudiada

El resultat final (Taula 11) mostra un rang de dades entre -0,0482 i 0,0282. Això significa que la variació d'NDVI per als píxels dels extrems del rang és de -0,8676 i 0,5076 respectivament durant el període de 18 anys compresos entre el 2000 i el 2018. Aquests són uns valors molt elevats, ja que l'índex NDVI oscil·la entre els valors de -1 i 1, però amb la distribució de la totalitat de valors es pot interpretar clarament que són casos residuals que no reflecteixen la tendència real. Com a valor mitjà, i per al període de 18 anys, les zones estudiades incrementen en 0,0630 el seu valor d'índex NDVI, estant el 68,2% d'elles ($\bar{x} \pm \sigma$) en el rang de 0,0234 a 0,1026, un increment moderat, però en tot cas positiu.

Taula 11. Valors anuals de la tendència de l'estat general de la vegetació

	Valor extrem	Mitjana (\bar{x})	Desviació estàndard (σ)
Tendència positiva	0,0282	0,0037	-
Tendència negativa	-0,0482	-0,0051	-
Total resultats	-	0,0035	0,0022

La millora en l'estat de la vegetació al llarg de la sèrie temporal es detecta tant a les zones boscoses amb cobertura superior al 60%, a les zones arbrades amb una cobertura inferior al 60% i als prats, les tres grans tipologies de cobertes del sòl que s'han tingut en compte en el treball (Figura 16). Estan repartides uniformement per tot el territori, però on la tendència adopta valors més alts (increment superior a 0,1350 en el període de 18 anys) és entre l'Alt Urgell, el Solsonès, el Bages i el Berguedà, a la Conca de Barberà i a les Terres de l'Ebre.

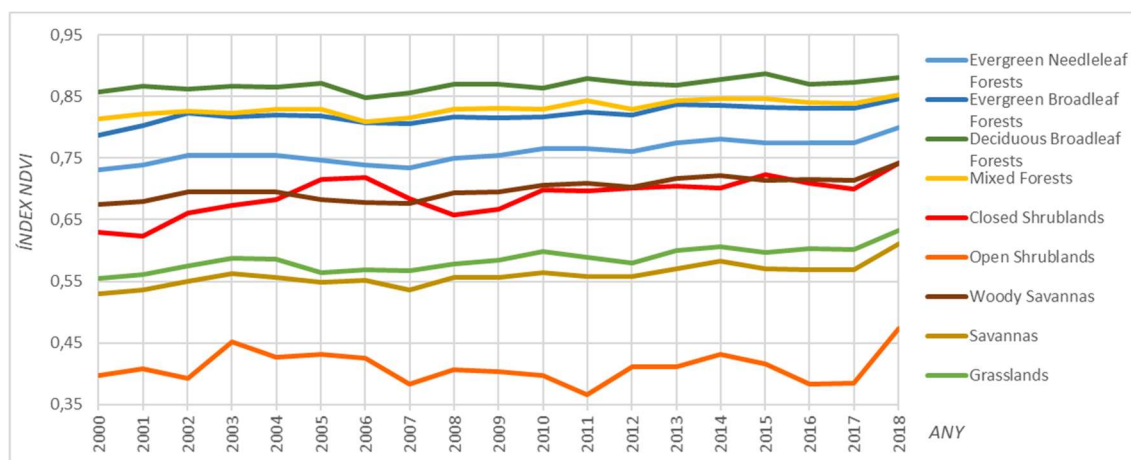


Figura 16. Mitjana anual d'NDVI segons les cobertes del sòl.

6.3. Correlació entre la vegetació i les dades climàtiques

En aquest últim apartat s'ha analitzat la correlació entre l'índex de vegetació NDVI i quatre variables climàtiques fonamentals, com la precipitació, la temperatura màxima, la temperatura mínima i la temperatura mitjana, amb dades mensuals de 16 anys, entre l'any 2000 i el 2015. Tot i que les dades estan ordenades temporalment, en aquest cas no s'ha calculat la tendència en funció del temps, sinó la relació entre l'estat de la vegetació i les condicions climatològiques corresponents.

Per una altre costat, cal mencionar que en cap cas s'ha entrat a diferenciar els possibles sentits de les correlacions. És a dir, si una correlació positiva indica que les dues variables augmenten o disminueixen alhora, o en una correlació negativa, quina d'elles augmenta i quina disminueix.

Les imatges resultants dels càlculs, per a cada cas, han sigut les següents:

- Coeficient de correlació de Pearson r : Expressa la relació entre les dues variables, ja sigui positiva (directa), negativa (inversa) o nul·la.
- Coeficient de determinació r^2 : Expressa la força de la relació entre les dues variables.
- Paràmetre t : Es correspon als valors de la taula de distribució t de Student. En aquest cas, al tractar-se d'una mostra gran, aquesta es comporta com una distribució normal.

Per obtenir les imatges per a l'anàlisi final, s'han aplicat les següents màscares:

- Nivell de significació estadística: Per acotar els resultats als píxels on la correlació és estadísticament significativa, s'ha escollit un nivell de significació de $\alpha = 0,05$. El valor t corresponent en la taula de distribució t de Student, per a una prova d'una cua (unilateral), és 1,645. Així, els píxels amb una valor t inferior a 1,645 s'han eliminat.
- Cobertes del sòl: S'han eliminat els píxels corresponents a les tipologies de cobertes del sòl definides com a no vàlides en l'apartat de descripció de les dades.
- Àmbit geogràfic de les dades climàtiques: A causa de que les imatges de les dades climàtiques no cobreixen tota l'àrea d'estudi, els píxels no coberts s'han eliminat.

Les imatges finals s'han analitzat per separat, i finalment se n'ha extret una visió conjunta.

6.3.1. Vegetació – Precipitació

En la imatge resultant (Figura 17) només s'hi reflecteixen 295.161 píxels representatius, un 37,7% dels 782.000 estudiats en aquest apartat.

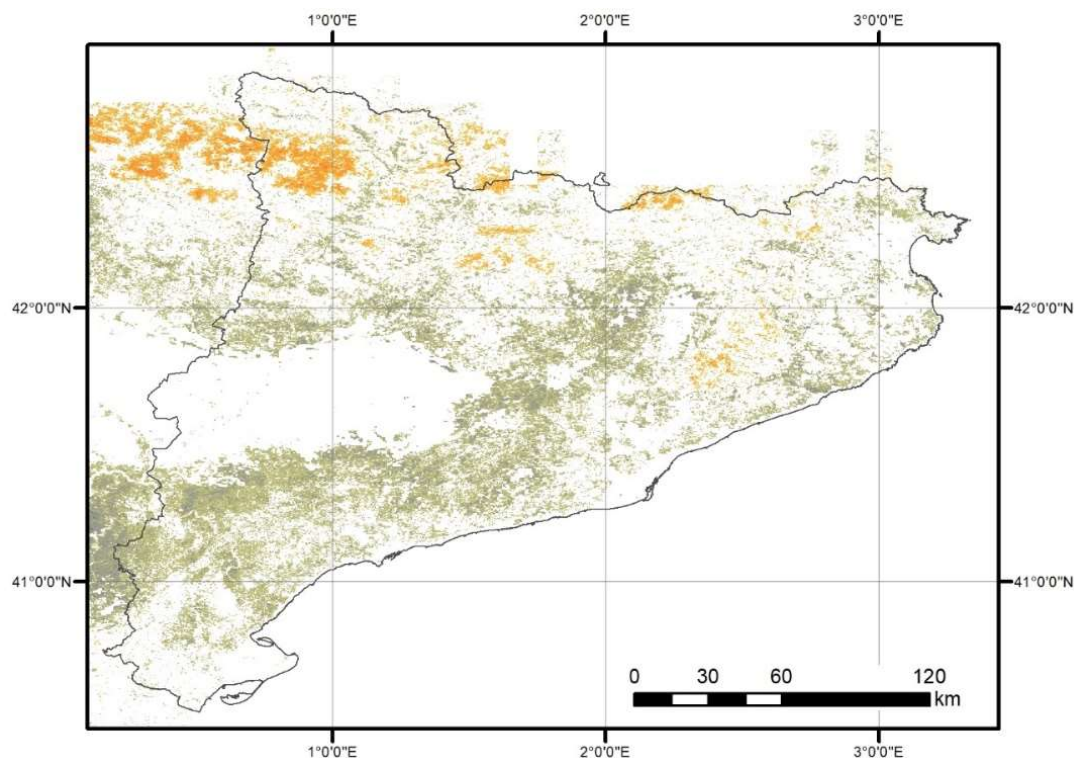
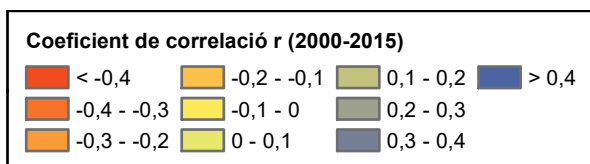


Figura 17. Correlació entre la vegetació i la precipitació.



Partint de la base que els càlculs ha aportat pocs píxels vàlids, la correlació que mostren és clarament directa (Taula 12), ja que el 30,9% dels píxels mostren valors positius. Això representa una superfície de 9.670,52 km², molt superior als 2.135,92 km² dels píxels amb valors negatius. Tot i ser estadísticament significants, el coeficient de determinació r^2 de la gran majoria de píxels adopta valors molt baixos, amb un màxim de 0,1743, pel que en cap cas es pot parlar d'un grau de relació alt.

Taula 12. Resultats de la correlació entre la vegetació i la precipitació.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Correlació directa	241.763	9.670,52	30,9%
Correlació inversa	53.398	2.135,92	6,8%
Total resultats	295.161	11.806,44	37,7%

*respecte la superfície estudiada

Pràcticament a tota Catalunya es pot apreciar una correlació positiva, però sobretot a la zona que va de la Catalunya Central, passant pel Prelitoral, fins al nord de les Terres de l'Ebre. Les zones amb correlació negativa estan focalitzades al Montseny, la Serra del Cadí, i sobretot al llarg de tot el Pirineu, en especial a la zona compresa entre l'Alta Ribagorça, el Pallars Jussà i el Pallars Sobirà.

Anàlisi fenològic de la vegetació amb sèries temporals d'NDVI a Catalunya i la seva relació amb el canvi climàtic

En aquesta última zona, principalment coberta per prats, és on s'observa una relació més forta, juntament amb les zones arbrades i prats del Lluçanès.

6.3.2. Vegetació – Temperatura

La correlació entre la vegetació i la temperatura s'ha calculat en base a tres variables diferents (temperatura màxima, mínima i mitjana).

6.3.2.1. Vegetació – Temperatura màxima

La imatge final (Figura 18) amb què s'ha analitzat la correlació entre la vegetació i la temperatura màxima compta amb 343.097 píxels amb dades significatives, el 43,9% del total.

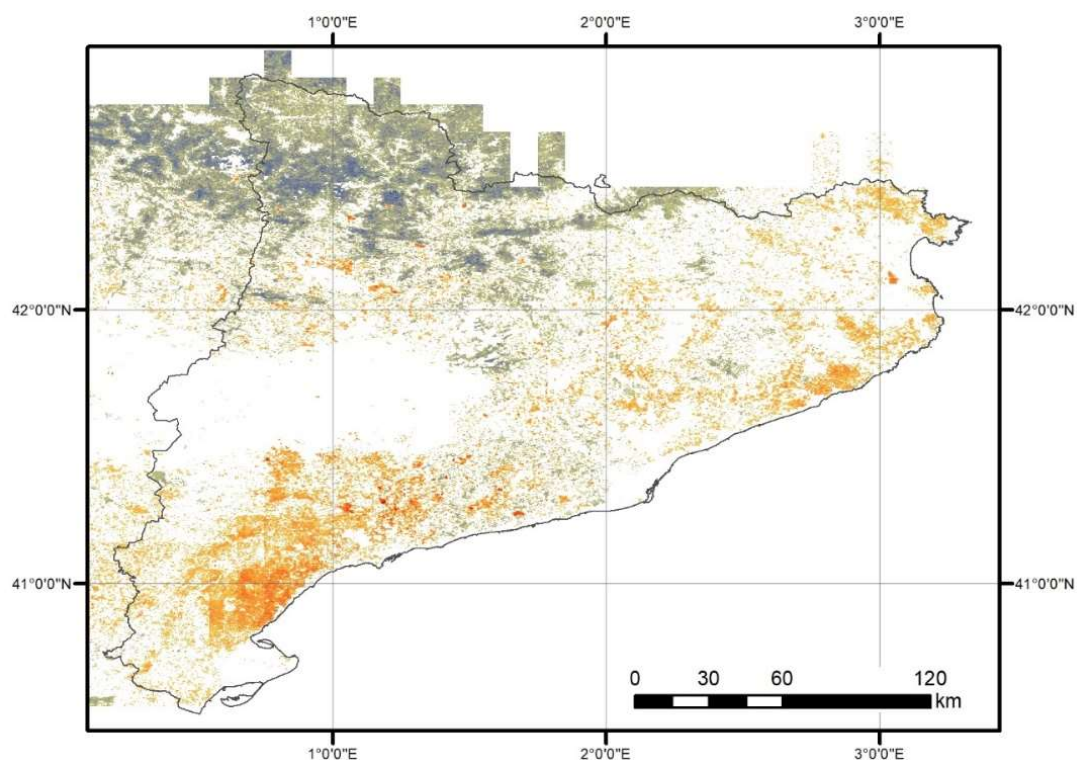


Figura 18. Correlació entre la vegetació i la temperatura màxima.

Coeficient de correlació r (2000-2015)			
< -0,5	-0,3 - -0,2	0 - 0,1	0,3 - 0,4
-0,5 - -0,4	-0,2 - -0,1	0,1 - 0,2	0,4 - 0,5
-0,4 - -0,3	-0,1 - 0	0,2 - 0,3	> 0,5

En general la correlació és directa (Taula 13), però tenint en compte que només un 27,1% final de les dades es mostren en aquest sentit, no es pot parlar d'un resultat molt clar. De totes maneres, en aquest cas el coeficient de determinació r^2 sí que arriba a valors mitjanament alts (0,4342), el que aporta fiabilitat al resultat.

Taula 13. Resultats de la correlació entre la vegetació i la temperatura màxima.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Correlació directa	212.227	8.489,08	27,1%
Correlació inversa	130.870	5.234,80	16,7%
Total resultats	343.097	13.723,88	43,9%

*respecte la superfície estudiada

Pel que fa a la distribució per zones, s'observa una correlació positiva especialment al Pirineu i Prepirineu central i oest, zona oest de la Catalunya Central i en particular al Montseny. La relació negativa es concentra a les comarques de Girona i Tarragona.

Les relacions més significatives es troben a la zona entre l'Alta Ribagorça, el Pallars Jussà i el Pallars Sobirà, i en zones arbrades i prats entre l'Alt Camp i el Baix Camp.

6.3.2.2. Vegetació – Temperatura mínima

Per la correlació entre la vegetació i la temperatura mínima s'ha obtingut una imatge final (Figura 19) amb 396.166 píxels, el 50,7% dels estudiats, el valor més alt dels quatre casos.

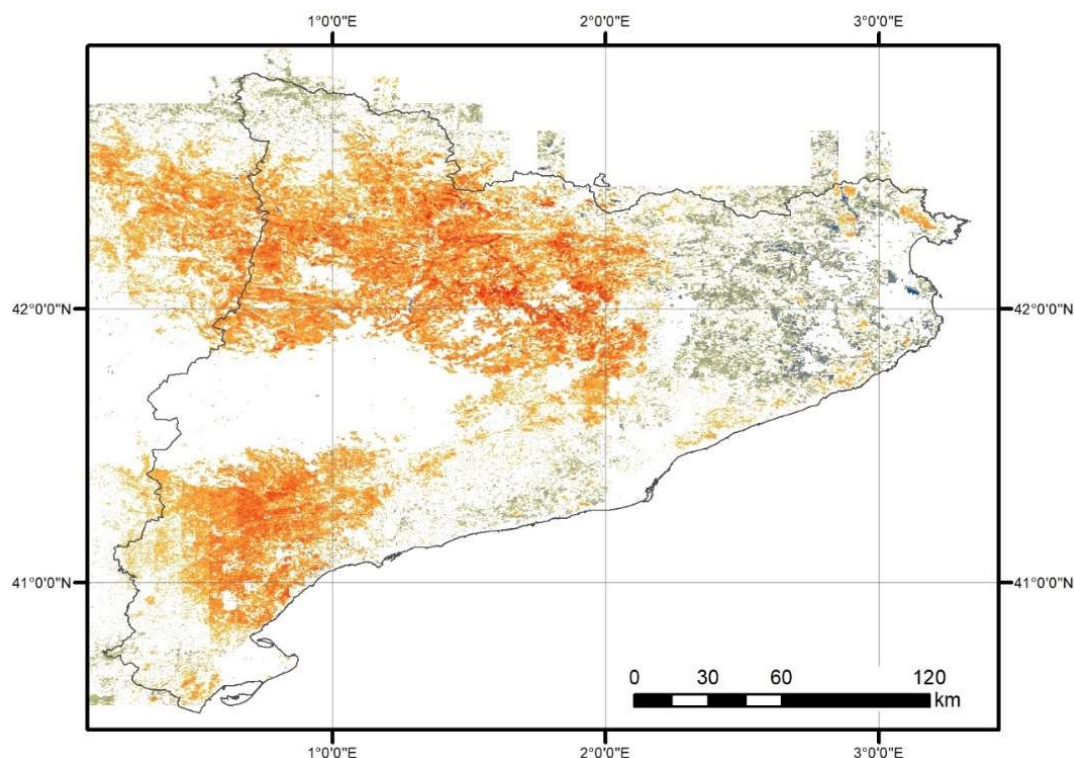
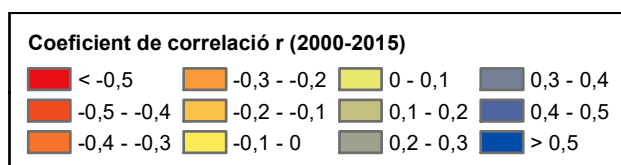


Figura 19. Correlació entre la vegetació i la temperatura mínima.



En aquest cas la correlació és clarament inversa (Taula 14). S'observa un resultat completament contrari al cas anterior, però molt més accentuat, amb el 38,9% dels píxels resultants indicant

Anàlisi fenològic de la vegetació amb sèries temporals d'NDVI a Catalunya i la seva relació amb el canvi climàtic

una correlació negativa. El coeficient de determinació r^2 també adopta un valor màxim moderadament significatiu (0,3666).

Taula 14. Resultats de la correlació entre la vegetació i la temperatura mínima.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Correlació directa	91.787	3.671,48	11,7%
Correlació inversa	304.379	12.175,16	38,9%
<i>Total resultats</i>	<i>396.166</i>	<i>15.846,64</i>	<i>50,7%</i>

*respecte la superfície estudiada

La zones amb correlació directa o positiva són les comarques de Girona i el Pirineu, especialment al nord de la Vall d'Aran i el Pallars Sobirà, mentre que la gran part de Catalunya mostra una correlació negativa (Catalunya Central, Lleida i Tarragona).

Les zones amb un grau de relació més elevat són les zones boscoses ubicades entre el Berguedà, el Solsonès i l'Alt Urgell, i gran part de la comarca del Priorat.

6.3.2.3. Vegetació – Temperatura mitjana

L'última imatge procedent dels càlculs, la que reflecteix la correlació entre la vegetació i la temperatura mitjana (Figura 20), conté 309.843 píxels com a resultat final, un 39,6% del total dels estudiats, essent el resultat amb pitjors dades de les obtingudes amb les temperatures.

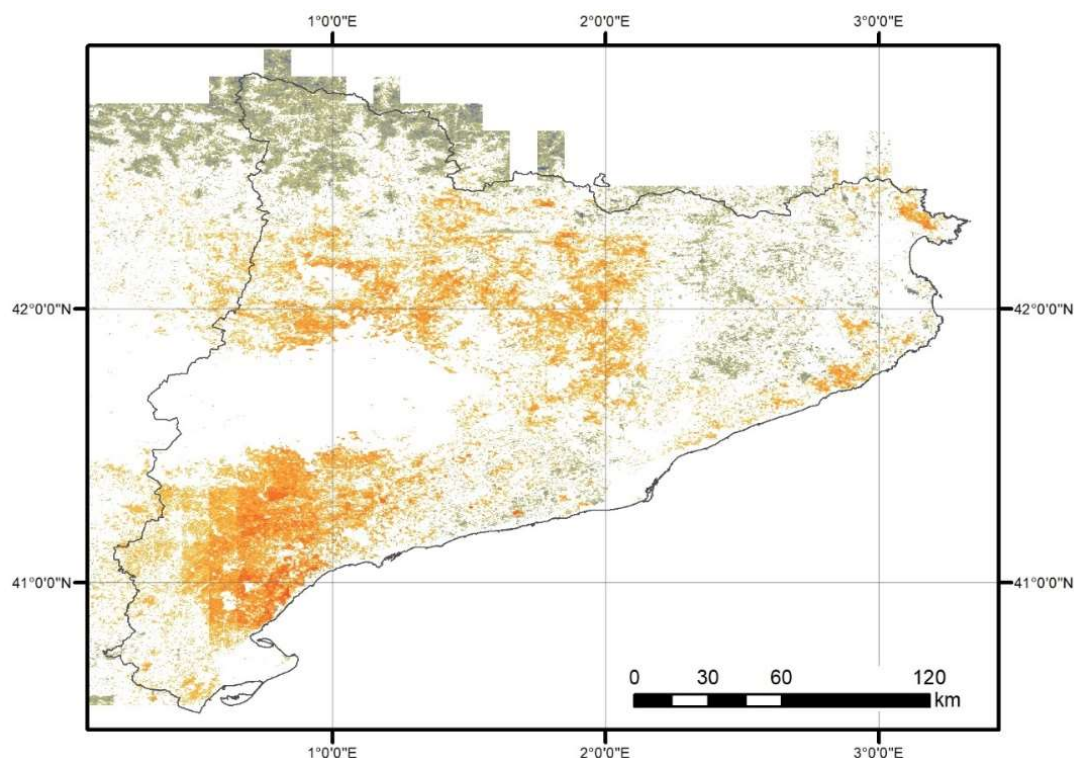
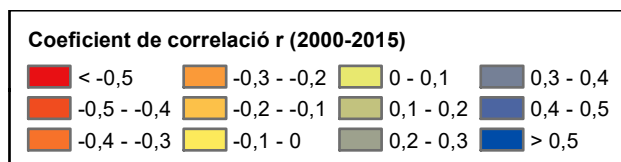


Figura 20. Correlació entre la vegetació i la temperatura mitjana.



La correlació també es mostra principalment negativa (Taula 15). Els resultats són molt semblants als de la correlació vegetació – temperatura mínima, però no tan marcadament negatius, i amb una significació estadística menor, amb un coeficient de determinació $r^2 = 0,2618$.

Taula 15. Resultats de la correlació entre la vegetació i la temperatura mitjana.

	Núm. de píxels	Superfície (km ²)	%*
Correlació directa	120.820	4.832,80	15,5%
Correlació inversa	189.023	7.560,92	24,2%
<i>Total resultats</i>	<i>309.843</i>	<i>12.393,72</i>	<i>39,6%</i>

*respecte la superfície estudiada

La zonificació és la mateixa que en el cas de la temperatura mínima però amb uns graus de relació més baixos, exceptuant el Pirineu central i oest, on es reforça la correlació positiva.

6.3.3. Resum

Amb l'anàlisi de la correlació amb les quatre variables, tot i que en cap cas la quantitat de píxels significatius ha permès extreure'n conclusions molt clares, s'han observat certs patrons o tendències zonals. Al mateix temps, aquests mostren la baixa relació que hi ha entre els efectes de la precipitació i la temperatura sobre la vegetació:

- Al Pirineu, a la zona central i especialment a l'oest, s'observa una correlació positiva però descendent en funció de les temperatures (màxima- mitjana-mínima), mentre que amb la precipitació s'observa una relació negativa.
- Un cas completament oposat al de Tarragona i les Terres de l'Ebre, on es mostra una correlació negativa i ascendent en funció de les temperatures (mínima-mitjana-màxima) i una correlació positiva amb la precipitació.
- Les comarques de Girona passen d'una correlació negativa a positiva en base a l'escala de temperatures (màxima- mitjana-mínima).
- La Catalunya Central i les comarques de Barcelona no mostren cap patró significatiu, i la zona interior de Lleida no s'ha avaluat degut a que pràcticament tot el territori correspon a camps de conreu.

7. Conclusions

El càlcul de les tendències temporals de l'estació de creixement no ha aportat els resultats que s'esperaven. Aquesta conclusió es basa en un aspecte purament quantitatiu ja que, aproximadament, només el 5% dels píxels estudiats han mostrat resultats amb una significació estadística acceptable. Això ha impedit detectar qualsevol mena de patró o aspectes comuns entre els quatre factors calculats a nivell local, i molt menys a nivell de tota Catalunya. Pel que fa a l'aspecte qualitatiu dels resultats, una tendència positiva, negativa, o una falta de tendència, s'hagués pogut interpretar, però no amb aquestes limitacions espacials. En aquest sentit, l'únic indicatiu que se n'ha pogut extreure és el fet que els quatre factors calculats mostren una tendència negativa, el que sí que és un resultat coherent. De totes maneres, per poder assegurar que la tendència de l'estacionalitat de la vegetació a Catalunya és negativa, és a dir, que s'avança en el temps, i quins efectes podria ocasionar aquest fet, s'hauria de realitzar un altre estudi més detallat que oferís més resultats.

Per un altre costat, el càlcul de la tendència de l'estat general de la vegetació sí que ha reflectit uns resultats concloents. En aquest cas, gairebé el 50% dels píxels estudiats (el 99% dels que han resultat estadísticament representatius) han mostrat que la vegetació millora amb el pas dels anys, això sí, de forma molt moderada. És un resultat inesperat, a la vegada que reconfortant, ja que s'esperava que els efectes negatius del canvi climàtic es fessin evidents en aquest cas. Quant a la distribució espacial dels resultats, aquests estan repartits de manera uniforme per tota Catalunya, però afecten de manera més intensa a la Catalunya Central i a les Terres de l'Ebre. Pel que fa a la tipologia del sòl, es detecta una tendència positiva tant en zones cobertes per prats herbacis, en zones boscoses o en zones arbrades amb cobertura d'arbres inferior al 60%, però especialment en aquesta última.

Finalment, amb l'anàlisi de les correlacions entre la vegetació i les variables climàtiques, els resultats obtinguts han sigut contradictoris. La correlació de la vegetació amb la precipitació és positiva però només en el 30% dels casos estudiats, fet que s'esperava més accentuat degut a la importància de l'aigua en el procés vital de la vegetació. El cas de la correlació entre la vegetació i la temperatura màxima és equiparable a l'anterior, però s'hi ha detectat un increment dels píxels que indiquen una correlació negativa fins al 17%. En els casos de la temperatura mitjana i sobretot la mínima, la correlació s'inverteix completament i es mostra negativa fins a gairebé el 40% dels casos estudiats. La mitjana-baixa significació estadística dels resultats i la incongruència entre la distribució espacial i els sentits de les correlacions, fan pensar que l'estat de la vegetació millora, però que no depèn només d'aquestes variables climàtiques. Un dels possibles motius d'aquests resultats podria ser la diferència de resolucions espacials entre les dades d'NDVI, de 200 m, i les climàtiques, de 10 km. A més, la precipitació és la variable climàtica fonamental més complexa de representar degut a la seva variabilitat espacial. Entrar a valorar amb més detall quin hauria de ser, a priori, l'efecte de cada un dels paràmetres climatològics sobre la vegetació, o quin sentit s'hauria de donar a les correlacions obtingudes, sobretot les negatives, podria ser objecte d'un altre estudi més específic.

Com a conclusió global d'aquest treball no es pot confirmar una afectació del canvi climàtic, representat pels valors de precipitació i temperatura ambiental, sobre la vegetació de Catalunya, tot i que sí que s'intueix un lleuger avançament de l'estació de creixement. El resultat més significatiu ha sigut la detecció d'una millora moderada en l'estat general de la vegetació. De totes maneres, els efectes del canvi climàtic existeixen i es fan evidents en altres zones del planeta més extremes, el que fa pensar que en un futur sí que afectaran Catalunya.

Bibliografia

- Felicísimo, A.M. et al., 2012. Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Ecosistemas*, 21(3), pp.1–6.
- Guo, W. et al., 2014. Spatial-temporal patterns of vegetation dynamics and their relationships to climate variations in Qinghai Lake Basin using MODIS time-series data. *Journal of Geographical Sciences*, 24(6), pp.1009–1021.
- Helsel, D.R. & Frans, L.M., 2006. Regional Kendall test for trend. *Environmental Science and Technology*, 40(13), pp.4066–4073.
- Hoaglin, D.C., Mosteller, F. & Tukey, J.W., 2000. *Understanding robust and exploratory data analysis*, New York: John Wiley.
- Lamprey, B.L., 2008. Comparison of gridded multisatellite rainfall estimates with gridded gauge rainfall over West Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), pp.185–205.
- Loveland, T.R. et al., 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), pp.1303–1330.
- Mas, J., 2011. *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*.
- Murphy, A.H., 1995. The Coefficients of Correlation and Determination as Measures of performance in Forecast Verification. *Weather and Forecasting*, 10(4), pp.681–688. Available at: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1995\)010%3C0681:TCOCAD%3E2.0.CO](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1995)010%3C0681:TCOCAD%3E2.0.CO).
- Neeti, N. & Eastman, J.R., 2011. A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), pp.599–611.
- Rouse, J.W. et al., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium*, 1, pp.309–317. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>.
- Wilks, D.S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0074614206800392>.

Agraïments

En primer lloc, agrair a la Directora d'aquest TFG, la meva tutora Càrol Puig, els coneixements específics sobre teledetecció i aquesta temàtica en concret, i altres més genèrics sobre la professió, la metodologia en el treball, etc., que m'ha aportat. La dedicació i la paciència que m'ha mostrat durant tot el procés de confecció d'aquest treball (més llarg del que esperava), la pressió que ha exercit sobre mi quan em feia falta una empenta i els ànims dels últims i durs dies. I finalment, l'oportunitat que m'ha donat de conèixer i treballar amb una gran professional i sobretot, persona.

També vull agrair a la meva família i als meus amics el suport que m'han donat durant aquest viatge de nou anys. Uns des de prop, uns altres des de més lluny, però tots m'han ajudat a trobar temps i sobretot ganes per seguir amb això, amb l'esforç que ha suposat arribar fins aquí.

Al meu cap i als companys de feina, per les facilitats que m'han donat en tot moment per poder dedicar-hi hores. De fet, tenen part de culpa en el fet que escollís aquest camí.

I especialment, a la meva parella. Per tot. Per tot el que he agraït més amunt, i per tot el que no puc reproduir amb paraules.

Annex

- Traducció a l'anglès del 30% de la memòria per tal d'acreditar la competència genèrica en tercera llengua

PHENOLOGICAL ANALYSIS OF VEGETATION WITH TEMPORAL SERIES OF NDVI IN CATALONIA AND ITS RELATION TO CLIMATE CHANGE

Author: Lluís Solà Castro

Director: Càrol Puig Polo

Call: September/October 2019

1. Introduction

Nowadays, almost no one doubts about the existence and effects of climate change on terrestrial ecosystems. Both governments and citizens seem to have accepted this fact and the obligation to propose solutions to the problem. In that way, on April 22nd, 2016, the Paris Agreement was signed. It was negotiated during the XXI Climate Change Conference (COP 21) by the 195 UN member countries. The main step adopted was the limitation on the increase in the global temperature to 1.5 °C.

Global warming is largely caused by the greenhouse effect produced by the emission of gases into the atmosphere by humans. This is causing the temporal modification, radicalization or neutralization of different natural, atmospheric or climatic phenomena throughout the planet, such as the rainfall regime, the melting of polar areas or desertification (Figure 1), for example. Other causes of global warming can be found in the massive waste generation or in deforestation, whether caused by massive logging or fires.

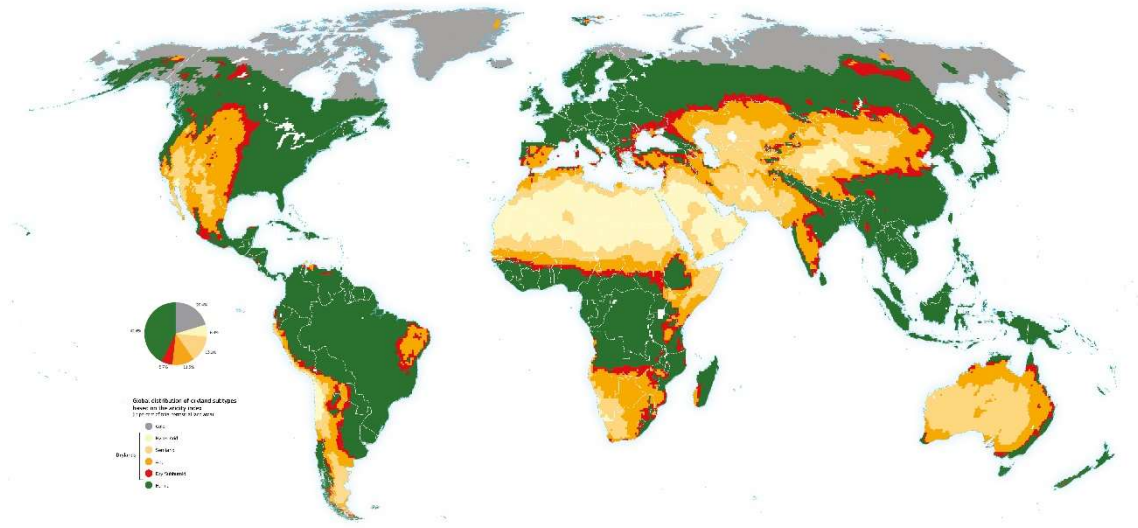


Figure 1. Global distribution of dryland subtypes based on the aridity index (AI). Source: World Atlas of Desertification.

Vegetation is a key element for life. Apart from its essential function as an air regenerator, it serves as a habitat and food for many of the animal species and sets the ground to protect it from erosion and prevent it from losing the basic nutrients it contains. On the other hand, vegetation is very vulnerable to changes of the fundamental climatic variables, such as precipitation and temperature (Felicísimo et al. 2012). Therefore, a great interest has been generated in the realization of different phenological studies on the state or the dynamics of vegetation growth both globally and regionally (Guo et al. 2014). Phenology is the branch of ecology that studies the relationships between climatic factors and seasonal cycles or events that occur in nature.

Catalonia is a region with a very rich biodiversity, with different areas of high mountains, coast, or large interior plains concentrated in a small area of territory, and with 32% of this

considered as protected. Almost 60% of the Catalan territory is covered with vegetation, and seeing the global situation in which we find ourselves, it is worthy of being studied.

Remote sensing techniques are appropriate for this kind of study. Images captured by satellites can offer a global coverage of the territory and long and updated time series practically in real time. In addition, they are easy to obtain. One of the main applications of satellite images are vegetation indexes, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), widely used for vegetation monitoring (density, growth, etc.). And in this sense, it is worth noting the MODIS sensor, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, installed on NASA's Terra and Aqua satellites.

1.1. Objectives

The objective of this project is to show the general state of vegetation in Catalonia by means of the study of temporal series of NDVI and other climatic data, such as precipitation and ambient temperature, in order to determine the changes it has undergone in the period between 2000 and 2018 and if it has been affected by climate change. To achieve this main objective, the project has been structured in three independent analyses that have allowed to create an overview of the case. They are the following:

- Define the temporal trends of the vegetation growing season and analyze them to determine if this is progressing or delayed during the period of time studied.
- Calculate the trend of the general state of vegetation according to the NDVI index.
- Compare the state of the vegetation with the precipitation and temperature data in order to define the relationship between them.

2. Study area

This project has been directed to study the entire territory of Catalonia. However, due to the ease of handling involved, in practice, a rectangular clip of predefined dimensions has been worked on (Figure 2).

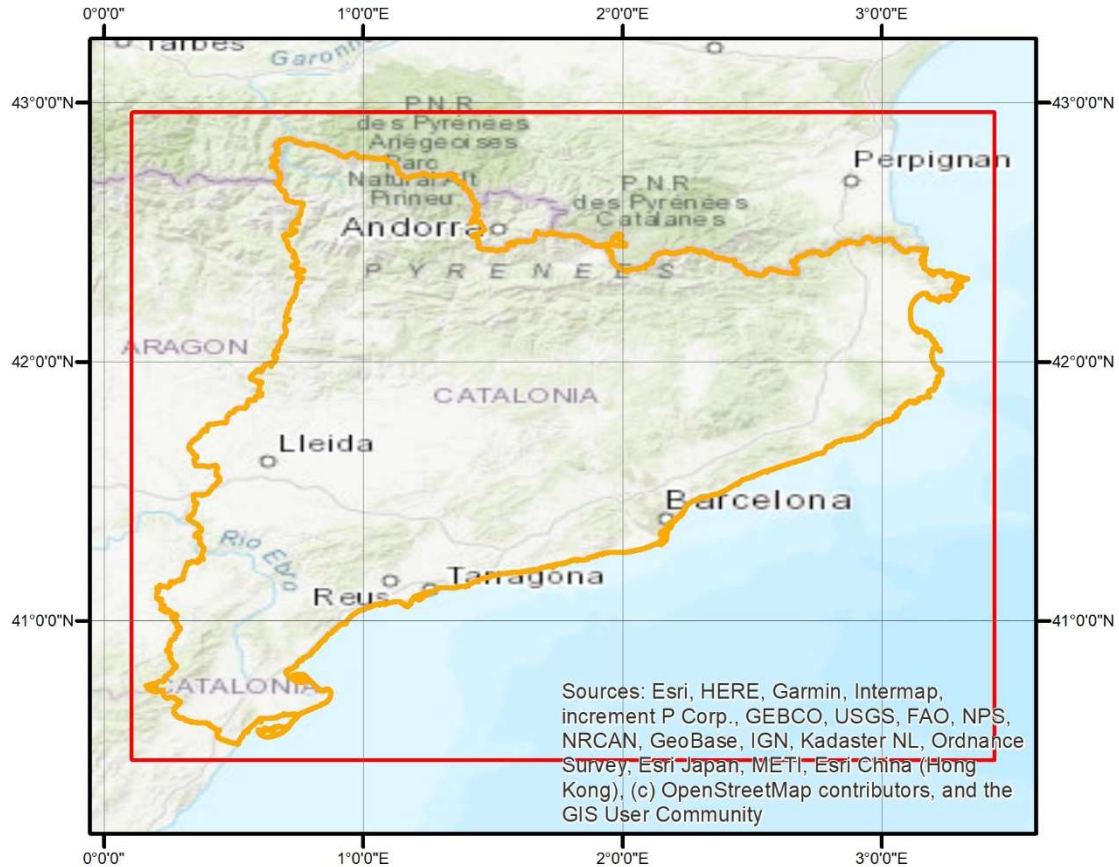


Figure 2. Study area.

Areas	
	Catalunya (32,105 km ²)
	Study area (76,973 km ²)

Therefore, the clip used is framed in the following geographical coordinates (Table 1):

Table 1. Coordinates and geographical scope of the study area.

	SW Corner	NE Corner	Geographical scope
Longitude E (°)	0,1041667	3,4375000	3,3333333
Latitude N (°)	40,4625000	42,9625000	2,5000000

3. MODIS project

MODIS is a sensor installed on NASA's Terra and Aqua satellites dedicated to capturing images for the study of global phenomena that take place both on the earth's surface, as well as in the oceans and the lower layers of the atmosphere. With this information it is possible to create different global models that allow the prediction of changes (for example, those related to climate change) and decision-making regarding environmental policies or actions in case of natural disasters (Figure 3). For further information about MODIS project, visit the website <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.

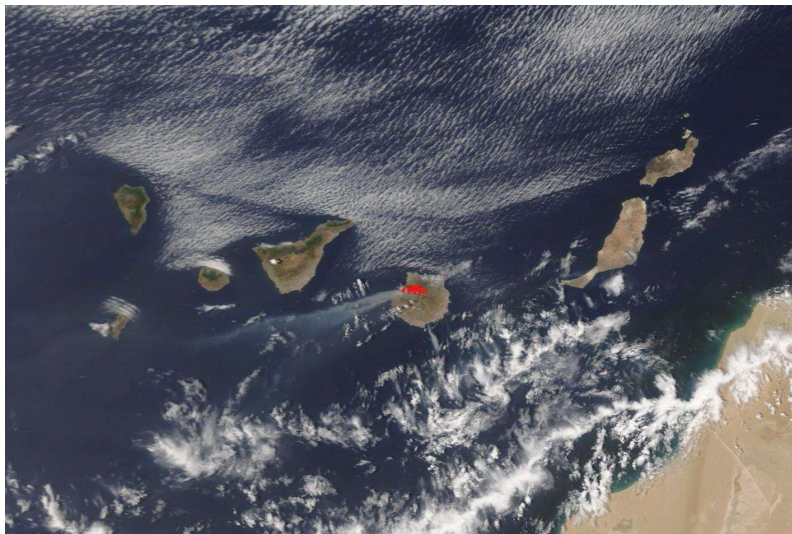


Figure 3. Large wildfire on the island of Gran Canaria (Spain): Natural-color image with areas with active fire detected by the thermal bands of the MODIS sensor. Source: NASA.

The Terra satellite was launched on December 18th, 1999, and the Aqua on May 4th, 2002. Both follow a sun-synchronous, near-polar (98.5° and 98.2° respectively), circular orbit at 705 km high with respect to the Earth's surface, so they always cross the equator at 10:30 a.m. in descending mode (Terra) and at 1:30 p.m. in ascending mode (Aqua), with a total of 16 daily orbits. For further information about Terra and Aqua satellites, visit the websites <https://terra.nasa.gov/> and <https://aqua.nasa.gov/>.

Apart from the MODIS sensor, both satellites carry other instruments capable of obtaining images that are used to study, for example, radiation or the presence of aerosols in the atmosphere, clouds, the water cycle, the state of ice sheets or the state of vegetation. In this last field, the MODIS sensor is very important, since the data it offers is one of the most used worldwide.

The MODIS sensor captures images in 36 spectral bands (Table 2), covering the electromagnetic spectrum between the wavelengths of $0.405\ \mu\text{m}$ (visible) and $14.385\ \mu\text{m}$ (infrared). It has a swath of 2,330 km, which allows it to completely cover the Earth every 1 or 2 days. It obtains images with spatial resolutions of 250 m, 500 m and 1,000 m.

Table 2. Spectral bands of MODIS sensor.

Primary Use	Band	Bandwidth (μm)	Spatial resolution (m)
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	0,620 - 0,670	250
	2	0,841 - 0,876	250
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	0,459 - 0,479	500
	4	0,545 - 0,565	500
	5	1,230 - 1,250	500
	6	1,628 - 1,652	500
	7	2,105 - 2,155	500
Ocean Color/Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	0,405 - 0,420	1.000
	9	0,438 - 0,448	1.000
	10	0,483 - 0,493	1.000
	11	0,526 - 0,536	1.000
	12	0,546 - 0,556	1.000
	13	0,662 - 0,672	1.000
	14	0,673 - 0,683	1.000
	15	0,743 - 0,753	1.000
Atmospheric Water Vapor	16	0,862 - 0,877	1.000
	17	0,890 - 0,920	1.000
	18	0,931 - 0,941	1.000
	19	0,915 - 0,965	1.000

Primary Use	Band	Bandwidth (μm)	Spatial resolution (m)
Surface/Cloud Temperature	20	3,660 - 3,840	1.000
	21	3,929 - 3,989	1.000
	22	3,929 - 3,989	1.000
	23	4,020 - 4,080	1.000
Atmospheric Temperature	24	4,433 - 4,498	1.000
	25	4,482 - 4,549	1.000
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1,360 - 1,390	1.000
	27	6,535 - 6,895	1.000
	28	7,175 - 7,475	1.000
Cloud Properties	29	8,400 - 8,700	1.000
Ozone	30	9,580 - 9,880	1.000
Surface/Cloud Temperature	31	10,780 - 11,280	1.000
	32	11,770 - 12,270	1.000
Cloud Top Altitude	33	13,185 - 13,485	1.000
	34	13,485 - 13,785	1.000
	35	13,785 - 14,085	1.000
	36	14,085 - 14,385	1.000

These images are combined to obtain various derivative products, grouped according to their theme: atmosphere, land, cryosphere or oceans. Within the group of land products, there are those that focus on the vegetation indexes (Table 3).

Table 3. MODIS Vegetation Index Products.

Product Name	MODIS Terra	MODIS Aqua
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m	MOD13Q1	MYD13Q1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m	MOD13A1	MYD13A1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km	MOD13A2	MYD13A2
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C1	MYD13C1
Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km	MOD13A3	MYD13A3
Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C2	MYD13C2

Of all the available products, the one chosen for the realization of this work is MOD13Q1, because it is the one that has a higher spatial resolution, a very important aspect due to the small area of study that is contemplated. It is also the one that has a larger time series, from February 18th, 2000, to the present.

4. Data

The fundamental data used to accomplish the analysis in question are the vegetation index, in this case the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and the climatic data, specifically of precipitation and temperature.

Land covers have also been used, not as analysis data but as a mask to narrow the results to the appropriate land types.

4.1. MOD13Q1 v006 NDVI vegetation index

The MOD13Q1 product is structured as a Scientific DataSet (SDS), a set of related information layers and their metadata, contained in an HDF-EOS file. Specifically, it contains 12 layers (Table 4), including vegetation indexes, the original bands necessary for its calculation, and other layers with additional data and quality indexes. For further information about MOD13Q1 product, visit the website <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>.

Table 4. MOD13Q1 layers.

SDS Name	Description	Units	Data Type	Fill Value	No Data Value	Valid Range	Scale Factor
250m 16 days NDVI	16 day NDVI	NDVI	16-bit signed integer	-3.000	N/A	-2.000 to 10.000	0,0001
250m 16 days EVI	16 day EVI	EVI	16-bit signed integer	-3.000	N/A	-2.000 to 10.000	0,0001
250m 16 days VI Quality	VI quality indicators	Bit Field	16-bit unsigned integer	65.535	N/A	0 to 65.534	N/A
250m 16 days red reflectance	Surface Reflectance Band 1	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days NIR reflectance	Surface Reflectance Band 2	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days blue reflectance	Surface Reflectance Band 3	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days MIR reflectance	Surface Reflectance Band 7	N/A	16-bit signed integer	-1.000	N/A	0 to 10.000	0,0001
250m 16 days view zenith angle	View zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10.000	N/A	0 to 18.000	0,01
250m 16 days sun zenith angle	Sun zenith angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-10.000	N/A	0 to 18.000	0,01
250m 16 days relative azimuth angle	Relative azimuth angle of VI pixel	Degree	16-bit signed integer	-4.000	N/A	-18.000 to 18.000	0,01
250m 16 days composite day of the year	Day of year VI pixel	Julian day	16-bit signed integer	-1	N/A	1 to 366	N/A
250m 16 days pixel reliability	Quality reliability of VI pixel	Rank	8-bit signed integer	-1	N/A	0 to 3	N/A

The available vegetation indexes are:

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- Enhanced Vegetation Index (EVI)

The index used to carry out this project has been the NDVI, since it is the most used in remote sensing, and allows different applications such as monitoring the conditions of vegetation cover on a global scale, deforestation and desertification studies, wildfire detection, global

characterization of biomes and drought prevention and forest fires risk studies from the analysis of multitemporal series. The EVI is an optimization of the NDVI that provides improvements in sensitivity in areas with high biomass density and reduces the influence of the atmosphere.

The NDVI is a normalization between near-infrared and red reflectance values (Rouse et al. 1974). It is calculated using the expression:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

where ρ_{NIR} = near-infrared reflectance (B2)

ρ_{Red} = red reflectance (B1)

The NDVI values vary between -1 and 1, where:

- < 0 Snow or water areas
- 0 – 0,2 Soils without vegetation
- 0,3 – 1 Areas containing more or less vegetation density

The NDVI values represented in the images used is the result of the composition of the values obtained during 16 days. To obtain these values, the Maximum Value Composite and the Constrained View angle - Maximum Value Composite (MVC and CV-MVC) algorithms are applied, which define the final value for each pixel taking into account the following factors:

- The maximum NDVI values obtained in the series
- Image quality factors (air pollution or cloud presence)
- Proximity of pixels to nadir (distortion)

Because of the data type of MOD13Q1 images is 16-bit signed (from -32,768 to 32,767), the digital values of the NDVI are scaled to fit the data type. Therefore, the range of useful values of the images is from -2,000 to 10,000 (Figure 4).

The original images have a geographical scope of 1,200 km × 1,200 km (4,800 × 4,800 pixels of 250 m), that have an equal-area sinusoidal projection (SIN).

Alternatively, preprocessed images can be downloaded, adapted to the needs of each case. In this way, it has been possible to download the entire time series (from 2000 to 2018), selecting only the NDVI layer, adjusted to the study area, as a TIFF file and referenced to the WGS84 datum. The geographical area of 3.33° of longitude and 2.50° of latitude corresponds to images of 1,600 × 1,200 pixels, with a spatial resolution of 0.0020833°, corresponding to 200 m.

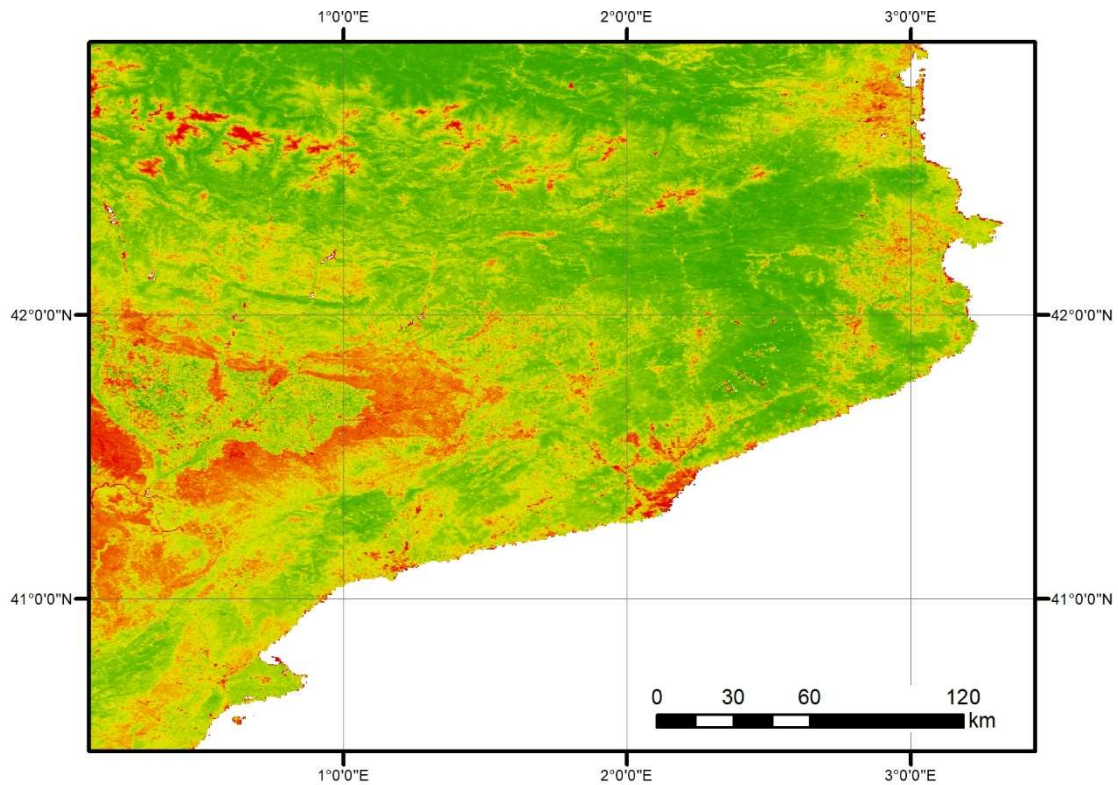
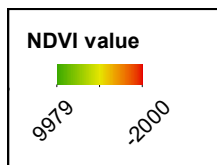


Figure 4. MOD13Q1 NDVI example.



The nomenclature of the images used is the following:

MOD13Q1.006_250m_16_days_NDVI_doyYYYYDDD_aid####.tif

where	MOD13Q1	MODIS product
	006	Version
	250m_16_days_NDVI	Layer
	DoyYYYYDDD	Observation start date (year and Julian day)
	aid####	Download area identifier
	tif	File format

The original MOD13Q1 images can be downloaded, along with the corresponding metadata, from the EarthExplorer viewer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) of the United States Geological Survey (USGS). The preprocessed images that have been worked on have been downloaded from the AppEEARS application (<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>), managed by the USGS itself.

4.2. Spain02 v5 climatic data

Spain05 project is carried out by the Santander Meteorology Group of Cantabria University (UC), in collaboration with the Spanish Meteorological Agency (AEMET). It consists of the creation of a 0.1° grid (± 10 km) that covers the peninsular Spain and the Balearic Islands, where daily precipitation (Figure 5) and ambient temperature (Figure 6) information of 2,756 weather stations across the country is shown.

In the latest version of Spain05 (v5) data are available from 1951 to 2015, so the study of the correlation between vegetation and climatic data has not been possible until 2018, as planned.

Data can be downloaded from the project's web site (<http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>). Each NetCDF file contains all the daily images for each variable.

4.2.1. Precipitation data

Precipitation data comes from the interpolation of daily records (from 7:00 a.m. to 7:00 a.m.) of some 2,500 weather stations.

The information is expressed in mm.

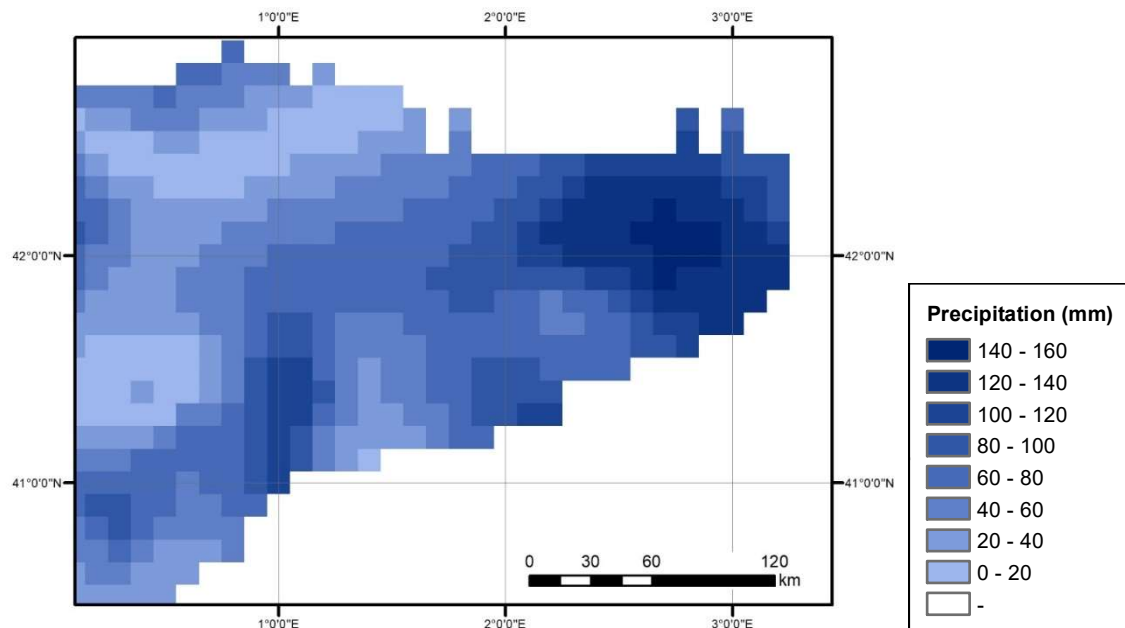


Figure 5. Spain02 v5 precipitation data example.

4.2.2. Temperature data

Temperature data are interpolated through the daily records of about 250 weather stations.

In this case, 3 series are available, corresponding to the maximum, minimum and mean temperature. The information is expressed in $^\circ\text{C}$.

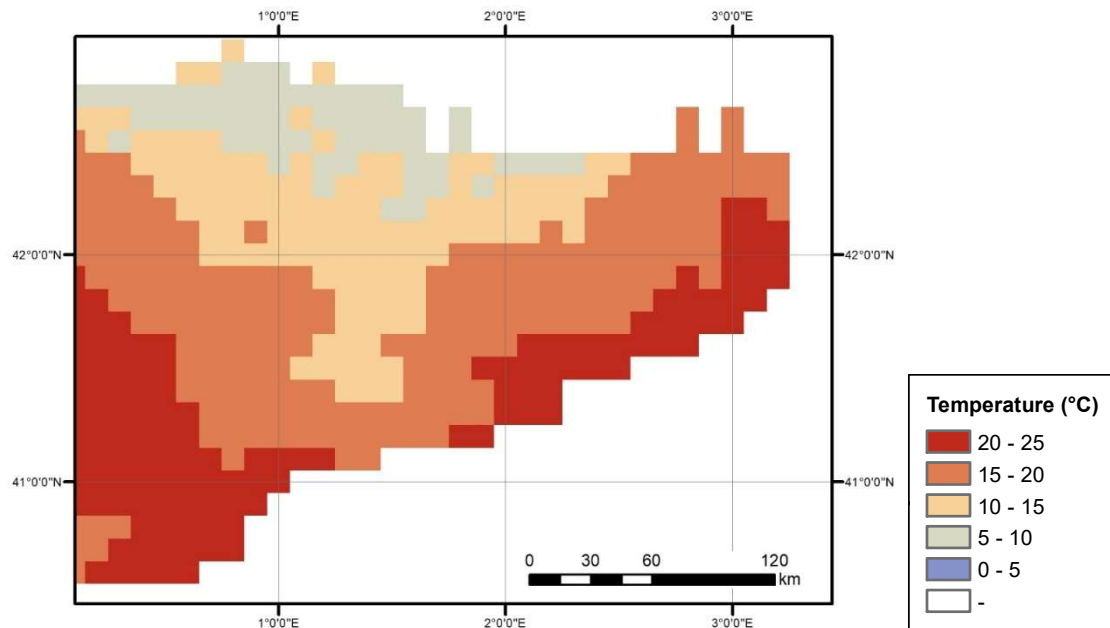


Figure 6. Spain02 v5 temperature data example.

4.3. Land cover MCD12Q1 v006

Land cover has been extracted from another MODIS product, the MCD12Q1, which is within the group of land products, such as MOD13Q1. The downloadable file is an HDF-EOS file and it is also structured as an SDS that contains 13 layers, such as 5 different land cover types, a land use layer, a land water mask or quality indexes. It can be downloaded from the same platforms as MOD13Q1.

The available land cover types are the following:

- Type 1: International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)
- Type 2: University of Maryland (UMD)
- Type 3: Leaf Area Index (LAI)
- Type 4: BIOME-Biogeochemical Cycles (BGC)
- Type 5: Plant Functional Types

The classification used has been the IGBP, and it has 17 classes or types of cover (Table 5). It was created from a monthly series of NDVI with a spatial resolution of 1 km², generated from data collected by NOAA's Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensor, between 1992 and 1993 (Loveland et al. 2000).

Table 5. IGBP classes.

Name	Value	Description
Evergreen Needleleaf Forests	1	Dominated by evergreen conifer trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Evergreen Broadleaf Forests	2	Dominated by evergreen broadleaf and palmate trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Deciduous Needleleaf Forests	3	Dominated by deciduous needleleaf (larch) trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Deciduous Broadleaf Forests	4	Dominated by deciduous broadleaf trees (canopy >2m). Tree cover >60%.
Mixed Forests	5	Dominated by neither deciduous nor evergreen (40-60% of each) tree type (canopy >2m). Tree cover >60%.
Closed Shrublands	6	Dominated by woody perennials (1-2m height) >60% cover.
Open Shrublands	7	Dominated by woody perennials (1-2m height) 10-60% cover.
Woody Savannas	8	Tree cover 30-60% (canopy >2m).
Savannas	9	Tree cover 10-30% (canopy >2m).
Grasslands	10	Dominated by herbaceous annuals (<2m).
Permanent Wetlands	11	Permanently inundated lands with 30-60% water cover and >10% vegetated cover.
Croplands	12	At least 60% of area is cultivated cropland.
Urban and Built-up Lands	13	At least 30% impervious surface area including building materials, asphalt, and vehicles.
Cropland/Natural Vegetation Mosaics	14	Mosaics of small-scale cultivation 40-60% with natural tree, shrub, or herbaceous vegetation.
Permanent Snow and Ice	15	At least 60% of area is covered by snow and ice for at least 10 months of the year.
Barren	16	At least 60% of area is non-vegetated barren (sand, rock, soil) areas with less than 10% vegetation.
Water Bodies	17	At least 60% of area is covered by permanent water bodies.
Unclassified	255	Has not received a map label because of missing inputs.

The data type is 8-bits unsigned (Figure 7). The range of useful values is 1 to 17 for different classes and 255 for unclassified pixels. The original images have a geographical scope of 1,200 km × 1,200 km (2,400 × 2,400 pixels of 500 m).

Although data are available from 2001 to the present, with an annual periodicity, for this project only the image corresponding to the year 2018 has been used, downloaded as a TIFF file, referenced to the WGS84 datum and with the same geographical scope as the MOD13Q1 images. The image size is 800 × 600 pixels, with a spatial resolution of 0.0041667°, corresponding to 400 m, but it has subsequently been resampled to adapt it to the spatial resolution of NDVI data.

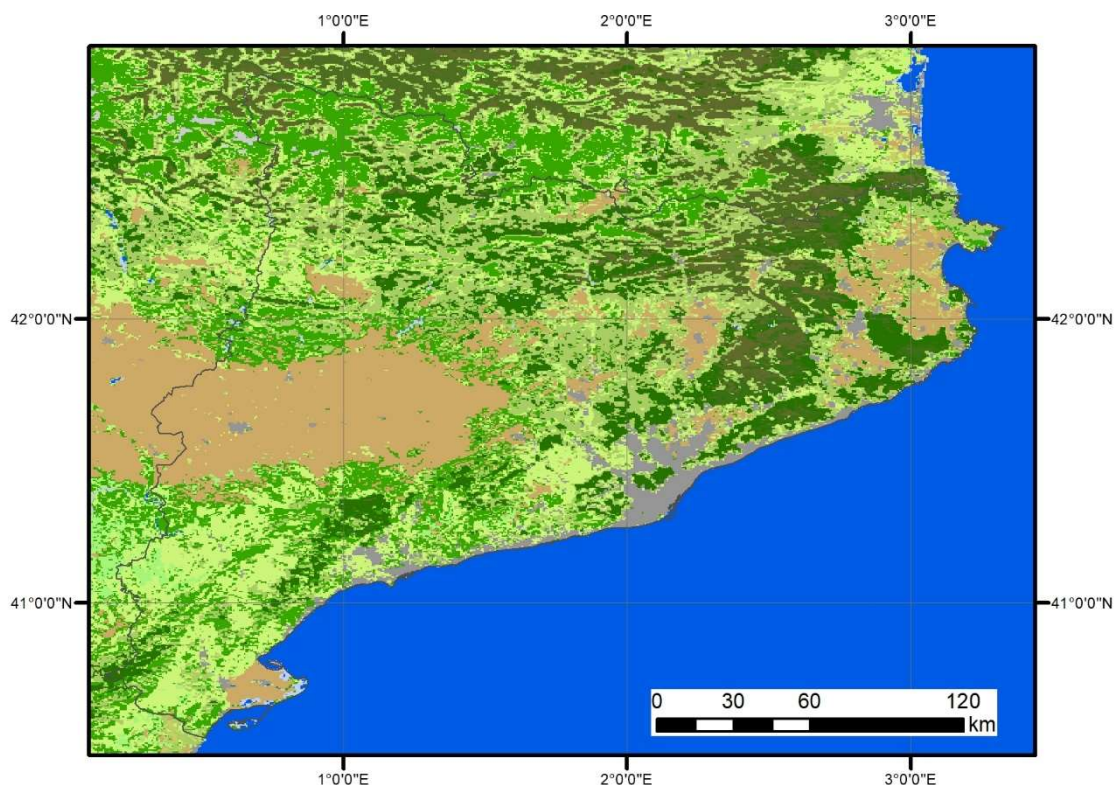


Figure 7. MCD12Q1 land cover Type 1: IGBP (2018).

Land covers		
Evergreen Needleleaf Forests	Open Shrublands	Croplands
Evergreen Broadleaf Forests	Woody Savannas	Urban and Built-up Lands
Deciduous Broadleaf Forests	Savannas	Cropland/Natural Vegetation Mosaics
Mixed Forests	Grasslands	Barren
Closed Shrublands	Permanent Wetlands	Water Bodies

The useful classes for the phenological analysis have been those between 1 and 10, those representing forests with a tree cover greater than 60%, woody areas with a tree cover less than 60%, shrublands and grasslands. Croplands have not been taken into account, since it has been considered that in these, the seasonality or simply the existence of vegetation is marked by the human being, not by natural phenomena. Obviously, urban areas, areas with permanent snow or ice and areas covered with water have also not been considered.

For further information about the MCD12Q1 land cover, visit the website <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>.